N° d'ordre : 2642

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE BORDEAUX 1

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

par **Stylianos KOUZELEAS**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPECIALITE : MECANIQUE
SCIENCES ET TECHNIQUES ARCHITECTURALES

DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE EN SIMULATION ACOUSTIQUE ARCHITECTURALE ADAPTABLE A UN SYSTEME DE MODELISATION C.A.O.

Thèse dirigée par : **Catherine SEMIDOR**

Soutenue le 19 Décembre 2002 devant la Commission d'Examen

Luc ADOLPHE,	*Professeur,*	Institut Français d'Urbanisme	**Rapporteurs**
Jacques BEAUMONT,	*Professeur,*	ENTPE, Vaulx en Velin	
Michel COMBARNOUS	*Professeur,*	Université Bordeaux 1	**Président**
Catherine SEMIDOR,	*Professeur,*	EAP, Bordeaux	**Encadrante**
Robert STRANDH,	*Professeur,*	Université Bordeaux 1	**Examinateur**

- 2002 -

N° d'ordre : 2642

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE BORDEAUX 1

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

par **Stylianos KOUZELEAS**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPECIALITE : MECANIQUE
SCIENCES ET TECHNIQUES ARCHITECTURALES

DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE EN SIMULATION ACOUSTIQUE ARCHITECTURALE ADAPTABLE A UN SYSTEME DE MODELISATION C.A.O.

Thèse dirigée par : **Catherine SEMIDOR**

Soutenue le 19 Décembre 2002 devant la Commission d'Examen

Luc ADOLPHE,	*Professeur,*	Institut Français d'Urbanisme	**Rapporteurs**
Jacques BEAUMONT,	*Professeur,*	ENTPE, Vaulx en Velin	
Michel COMBARNOUS	*Professeur,*	Université Bordeaux 1	**Président**
Catherine SEMIDOR,	*Professeur,*	EAP, Bordeaux	**Encadrante**
Robert STRANDH,	*Professeur,*	Université Bordeaux 1	**Examinateur**

- 2002 -

« Chaque connaissance, chaque science qui s'éloigne de la justice et d'autres vertus, est de la ruse et de l'erreur et non de la sagesse »

Platon

Toute ma reconnaissance à mes parents, qui se sont battus pour que je devienne tout d'abord un homme bon avant de devenir un bon scientifique. Je vous aime…,

A toi pour ton amour intégrant et ton soutien permanent…

Remerciements

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués en partie au sein du laboratoire GRECO (Groupe de Recherche Environnement Conception), anciennement appelé ***ERIAC*** *(Equipe de Recherche Interdisciplinaire sur l'Acoustique et le Confort) de l'école d'Architecture et de Paysage de Bordeaux.*

Au terme de ces années de doctorat, c'est avec plaisir que j'ai l'occasion de pouvoir remercier officiellement tous ceux et celles, qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce travail.

Mes remerciements s'adressent d'abord à ***Mme Catherine SEMIDOR****, Professeur de l'Ecole d'Architecture et de Paysage de Bordeaux (EAPBx) et responsable du GRECO, qui a encadré ma thèse. J'ai envie de lui exprimer sincèrement mon entière gratitude pour son soutien bienveillant tout au long de ces années. Je suis profondément reconnaissant pour m'avoir permis de partager ses connaissances scientifiques vastes, pour m'avoir encouragée à persévérer dans ce travail, ainsi que pour la grande autonomie et confiance qu'elle m'a accordée. Ses commentaires avisés m'ont permis d'assurer une cohésion à l'ensemble de mes recherches, de les approfondir et d'entrevoir d'autres pistes de recherche. Son soutien moral permanent dans des moments difficiles, son exemple d'humilité et sa qualité humaine restent dans ma mémoire.*

Monsieur ***Michel COMBARNOUS*** *président de la commission d'Examen, messieurs* ***Jacques BEAUMONT*** *et* ***Luc ADOLPHE*** *qui ont accepté d'être rapporteurs dans cette thèse ainsi que* ***Robert STRANDH*** *qui a particpé au jury en tant qu'examinateur, qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.*

Que ***Jean-François DINDART****, thésard au LaBri de l'Université de Bordeaux 1, soit également assuré de ma gratitude, pour me faire partager généreusement sa compétence scientifique lors de nos longues conversations.*

Je remercie chaleureusement ***Emmanuel MERIDA****, membre du GRECO, ainsi que* ***Philippe WOLOSZYN****, chercheur au CNRS et enseignant de l'école d'architecture de Nantes, pour les éclaircissements divers qu'ils ont pu apporter lors de nos discussions.*

Mes sincères remerciements vont à Monsieur ***Vincent AUZANNEAU****, ancien directeur de l'EAPBx pour son accueil chaleureux et son attention particulièrement humaine et généreuse à mon égard.*

Je souhaite aussi remercier ***Fabienne DARRRICAU****, responsable de l' « atelier multimedia » de l'EAPBx de m'avoir permis m'intégrer et collaborer au sein de son équipe, ainsi que d'autres enseignants et personnel de l'EAPBx qui ont croisé ma route au sein de l'EAPBx, pour leurs conseils, leur aide et leur réconfort.*

Je tiens à exprimer également mes remerciements sans les nommer à tous les membres du GRECO pour leur accueil et l'ambiance de travail qu'ils savent créer.

Je ne saurais pas oublier, ***Vassilis, Jérôme, Francis, Pascale, Elli, Charles, José*** *et bien d'autres, dont leur soutien moral permanent, leur amitié sincère et le partage de bons*

moments m'ont permis de supporter toute la pression et le stress inévitable d'une combinaison « travail-études ».
A ***Vicky****, pour son amour intégrant et son soutien sans limite, qui a dû supporter mon absence…*

Enfin et surtout je finirai par ceux qui ont du supporter également mon absence pendant plusieurs années, ***mes parents*** *et ma famille qui par leur affection, leur soutien continu et leurs efforts, ont édifié pour moi les fondations sur lesquelles j'ai pu m'appuyer pour construire à mon tour. Leur attention et leur confiance furent toujours une source de réconfort. Je tiens, tout simplement, à vous dédier cette thèse.*

Table des matières

1. Introduction …………………………………………………………………………….. **1**

2. Méthodes informatiques en acoustique et outils utilisés……………………………….. **7**

2.1 Principes méthodes informatiques en acoustique……………………………………. 9
2.2 Etude des qualités / défauts de certains logiciels de prévision acoustique ………….. 11
2.2.1 Introduction…………………………………………………………………11
2.2.2 Epidaure……………………………………………………………………. 11
2.2.3 Raynoise……………………………………………………………………. 13
2.2.4 Odeon……………………………………………………………………….. 15
2.2.5 Catt-acoustic………………………………………………………………. 17
2.3 Conclusions…………………………………………………………………………… 21

3. Outils d'aide de prévision acoustique et de modélisation architecturale…………….. **25**

3.1 Introduction…………………………………………………………………………. 27
3.2 Outils de prévision acoustique et modélisation……………………………………... 27
3.3 Outils de modélisation architecturale et calcul acoustique………………………….. 31
3.4 Logiciels de simulation acoustique et logiciels de conception architecturale…… 31

4. Processus informatique d'aide à la modélisation géométrique d'un espace en vue de la simulation acoustique…………………………………………………………. **37**

4.1 Processus informatique et conception architecturale………………………………… 39
4.2 Définition des phases du processus informatique de modélisation……………….. 41
4.2.1 Phase 1 : Collecte d'éléments architecturaux………………………………... 41
4.2.2 Phase 2 : Modélisation complète…………………………………………… 43
4.2.3 Phase 3 : Transformation du volume 3D en facettes triangulaires…….. 43
4.2.4 Phase 4 : Elaboration – affinement - simplification de la géométrie surfacique………………………………………………………………. 47
4.2.5 Phase 5 : Gestion des calques……………………………………………….. 51
4.2.6 Phase 6 : Gestion des blocs…………………………………………………... 53
4.3 L'influence du modèle architectural simplifié aux résultats acoustiques……….. 55
4.3.1 Introduction…………………………………………………………………….. 55
4.3.2 Méthode de travail…………………………………………………………….55
4.3.3 « Calage du modèle »………………………………………………………….. 57
4.3.4 Elaboration des modèles……………………………………………………..… 59
4.3.5 Résultats du calcul…………………………………………………………… 63
4.3.6 Conclusions…………………………………………………………………… 63
4.4 Analyse des conséquences de la simplification d'un modèle architectural sur les résultats acoustiques…………………………………………………………..… 65
4.4.1 Introduction……………………………………………………………………. 65

4.4.2 Comparaison des surfaces après simplification…………………………65
4.4.3 Principes des méthodes de simplification……………………………….69
4.4.4 Conclusions………………………………………………………………. 69
4.4.5 Réflexions entre modélisation et simplification…………………………. 71

5. Traduction architecturale et évaluation des résultats acoustiques……………………. **73**

5.1 Introduction………………………………………………………………………. 75
5.2 Présentation du module de traduction architecturale des résultats acoustiques… 75
5.2.1 Calcul avec évaluation des valeurs des critères objectifs………………….. 77
5.2.1.1 Calcul avec évaluation d'un critère objectif d'une salle sous toutes les bandes de fréquences……………………… 77
5.2.1.2 Evaluation d'un critère objectif de plusieurs salles sous une seule bande de fréquence………………………………………79
5.2.1.3 Calcul avec évaluation de plusieurs critères objectifs d'une salle sous une seule bande de fréquence………………….. 81
5.2.2 Récupération des valeurs des critères objectifs……………………………. 83
5.2.3 Présentation des valeurs des critères objectifs……………………………… 85
5.2.3.1 Présentation d'un critère objectif d'une salle sous toutes les bandes de fréquence…………………………………………….85
5.2.3.2 Présentation d'un critère objectif de plusieurs salles sous une bande de fréquence……………………………………………. 87
5.2.3.3 Présentation de plusieurs critères objectifs à la fois d'une salle sous une bande de fréquence…………………………… 87
5.3 Conclusions……………………………………………………………………………89

6. Plate-forme d'aide en simulation acoustique………………………………………… **91**

6.1 Introduction………………………………………………………………………. 93
6.2 Présentation des composantes de la plate-forme d'aide en simulation acoustique………………………………………………………………. 95
6.2.1 Présentation de la composante « Pédagogie »…………………………….95
6.2.1.1 Base de données……………………………………………………97
6.2.1.2 Approche géométrique………………………………………………101
6.2.1.3 Approche statistique………………………………………………… 105
6.2.1.4 Analyse détaillée………………………………………………………107
6.2.2 Présentation de la composante « Modélisation »…………………………. 107
6.2.2.1 Processus de modélisation……………………………………………107
6.2.2.2 Simplification de modèles……………………………………………107
6.2.3 Présentation de la composante « Traduction et évaluation »…………….. 109
6.2.4 Présentation de la composante « Calcul »…………………………………. 109
6.2.4.1 Etude géométrique……………………………………………………..109
6.2.4.2 Calcul de critères objectifs…………………………………………….. 113
6.3 Perspectives………………………………………………………………………… 117

7. Annexes …… **119**

7.1 Présentation technique de la plate-forme d'aide en simulation acoustique……… 121
7.1.1 Introduction…… 121
7.1.2 Présentation du moteur de calcul interne / externe…… 121
7.1.3 Analyse du fonctionnement technique des « routines » informatiques… 123
7.1.3.1 Base de données…… 123
7.1.3.2 Approche statistique…… 125
7.1.3.3 Processus de modélisation…… 125
7.1.3.4 Etude géométrique…… 127
7.1.4 Etapes analytiques des phases du processus informatique de modélisation…… 129
7.2 Calage du modèle de salle sur les mesures par modification des paramètres architecturaux …… 133
7.3 Comparaisons des résultats acoustiques…… 136
7.4 Critères objectifs usuels et leurs valeurs optimales…… 139
7.5 Exemples d'expressions mathématiques et algorithmes utilisés dans les programmes informatiques…… 142

8. Bibliographie …… **155**

Chapitre 1

Introduction

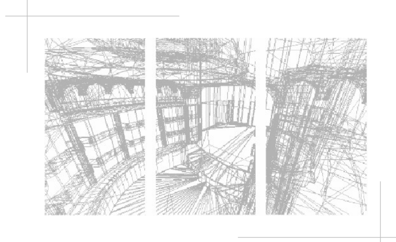
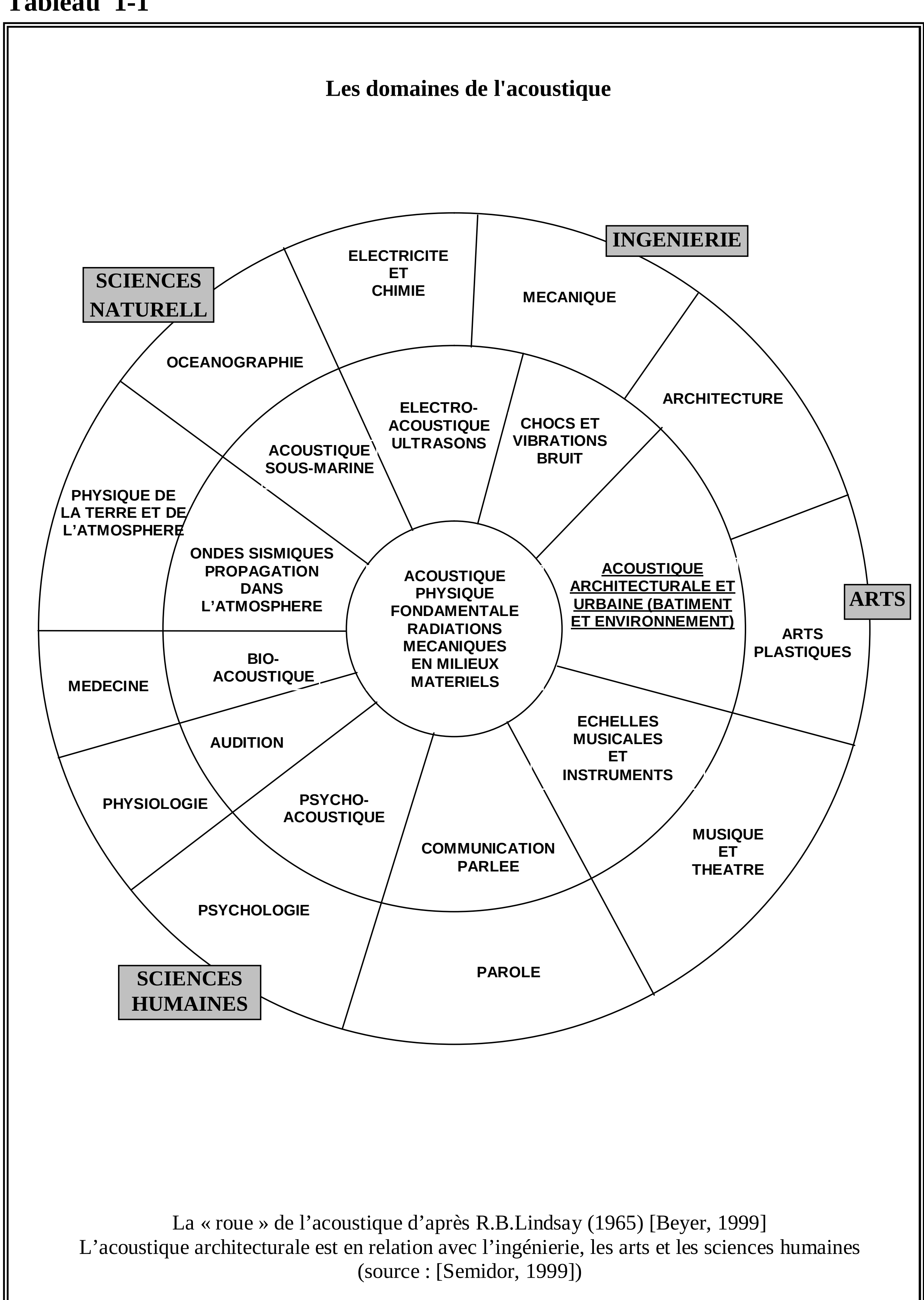


Tableau 1-1



La « roue » de l'acoustique d'après R.B.Lindsay (1965) [Beyer, 1999]
L'acoustique architecturale est en relation avec l'ingénierie, les arts et les sciences humaines (source : [Semidor, 1999])

1. Introduction

Ces dernières années, l'informatique appliquée d'un coté et la science de l'acoustique de l'autre côté ont beaucoup évolué. On est passé de la « méthode analogique » de prévision acoustique qui consiste à construire des modèles à échelle réduite de la géométrie d'un espace et tester ensuite son acoustique, à la « méthode numérique » qui consiste en une simulation acoustique sur ordinateur de plus en plus performante. Actuellement, il existe un grand nombre des logiciels de simulation acoustique, qui essayent de mieux gérer les critères objectifs fondamentaux de l'acoustique, afin de qualifier et d'améliorer la qualité d'un espace sonore. La simulation acoustique sur ordinateur présente des énormes avantages mais en même temps des limites qui correspondent parmi d'autres à la mise en géométrie d'un espace.

Les logiciels de simulation acoustique prennent en compte un grand nombre de paramètres acoustiques, tels que l'absorption, la diffusion, la réflexion, etc… ; ils calculent à partir d'une modélisation de la géométrie d'un espace, un certain nombre des critères objectifs tels que le Temps de Réverbération (Tr), le Temps de la Décroissance Précoce (EDT), la Répartition de la force sonore dans l'espace à travers des échogrammes, etc..., en s'appuyant sur le principe de l'acoustique géométrique et statistique à la fois. La modélisation de la géométrie d'un espace comme une salle par exemple, dans un logiciel de simulation acoustique, est plus ou moins difficile suivant le logiciel ; on est souvent obligé de définir toutes les coordonnées de chaque facette de la géométrie de la salle, en passant par un éditeur de texte ASCII par exemple. C'est pour cela que la quasi totalité des logiciels de ce type, sont ouverts à une importation des fichiers de format *.dxf, qui est soutenu presque par tous les logiciels de modélisation, dont AutoCAD. Or, il reste presque impératif d'importer dans un logiciel de calcul acoustique, une modélisation déjà faite sur un autre logiciel de modélisation, afin de pouvoir simuler au plus proche possible de la réalité, la vraie géométrie de l'espace souhaité. Cette modélisation doit être en facettes coplanaires afin qu'elle puisse être lisible par ces logiciels, ce qui explique la nécessité de description d'une méthodologie (processus informatique) de modélisation architecturale en vue de simulation acoustique.

La philosophie très « technique » du fonctionnement des logiciels de simulation acoustique d'un espace architectural n'intègre pas de réflexion architecturale ce qui pose des problèmes de « communication » entre le monde de la conception architecturale et celui de l'acoustique. L'adaptation de l'espace au principe du fonctionnement d'un logiciel de prévision acoustique pendant sa phase de conception et vice versa, devient alors une nécessité.

Ce travail consiste d'une part à définir différents processus de modélisation et simplification des modèles architecturaux en vue de simulation acoustique, traduire leurs résultats de manière architecturale et intégrer une démarche architecturale dans la conception acoustique et d'autre part mettre en œuvre une interface permettant d'intégrer et adapter un moteur de calcul acoustique, des modules graphiques et tous ces processus développés dans un logiciel de modélisation architecturale. Cet outil-interface (« plate-forme ») adaptable à un logiciel de modélisation C.A.O. aidera les architectes pendant la conception architecturale d'un espace acoustique et il sera destiné à des architectes et à des ingénieurs de différents niveaux de connaissance acoustique. Cet outil peut également être utilisé pour des raisons purement pédagogiques.

Cette recherche s'inscrit dans le domaine de l'application informatique et essaye de rapprocher le monde de l'architecture avec celui de l'acoustique à l'aide de l'informatique. Cela concerne plus précisément le développement des interfaces techniques et des processus facilitant le rapprochement des données acoustiques et des données de modélisation architecturale, en intégrant tout processus développé ici, dans un outil adapté à un logiciel de modélisation architecturale destiné à des architectes ou à des étudiants d'architecture.

Ce document est constitué des chapitres suivants :

Le deuxième chapitre couvre les méthodes informatiques utilisées en acoustique ainsi que d'une étude comparative des qualités / défauts de certains logiciels de prévision acoustique.

Le troisième chapitre concerne le rapport des outils de simulation acoustique et de modélisation architecturale. Ce chapitre présente les contraintes, les résultats et les finalités de ces outils afin de mieux comprendre la nécessité d'intégration, développement et d'adaptation de ces outils dans la même interface.

Le quatrième chapitre comprend l'adaptation du processus informatique de conception architecturale au processus de simulation acoustique. Ce chapitre concerne :
- le développement et l'intégration du modèle de calcul acoustique dans le fonctionnement de modélisation architecturale,
- le développement du processus informatique d'aide à la modélisation géométrique d'un espace en vue de la simulation acoustique,
- l'influence du modèle architectural simplifié aux résultats acoustiques et, enfin,
- l'analyse des conséquences de la simplification du modèle architectural aux résultats acoustiques et la présentation de la méthode de simplification.

Le cinquième chapitre concerne la traduction architecturale des résultats de l'outil en simulation acoustique architecturale. Ce chapitre présente les résultats de la simulation acoustique sous forme graphique et il traduit ces résultats de manière compréhensible et architecturale en comparant les résultats obtenus avec les résultats optimaux afin de les évaluer. Cette traduction architecturale se fait en fonction de différents éléments comme le volume de la salle, le type de spectacle, les valeurs acoustiques optimales, etc... Une partie de la traduction architecturale peut servir à la pédagogie acoustique à travers des présentations et des explications des éléments architecturaux (salles - formes-diagrammes) en fonction du comportement acoustique (lancement des rayons- réflexions- comparaisons des résultats).

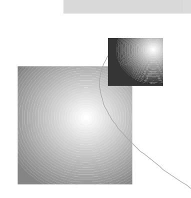
Le sixième chapitre présente l'interface technique et graphique de la plate-forme d'aide en simulation acoustique proposée et adaptable à un logiciel de modélisation C.A.O. qui rassemble toutes les recherches développées ici en les rendant opérationnelles et automatisées pendant la phase même de la conception architecturale. Il s'achève par des conclusions et des perspectives.

Le septième chapitre, qui comprend les annexes, concerne des analyses techniques et informatiques de toute étude intégrée dans la plate-forme d'aide en simulation acoustique

proposée. Il présente la comparaison et l'évaluation des résultats acoustiques de la plate-forme proposée avec des résultats d'autres logiciels acoustiques et des mesures acoustiques effectuées. Enfin il présente les valeurs optimales des critères objectifs usuels qui sont utilisées dans la traduction architecturale des résultats acoustiques ainsi que des algorithmes développés et des expressions mathématiques utilisées dans les « routines » informatiques.

Chapitre 2

Méthodes informatiques en acoustique et outils utilisés



2. Méthodes informatiques en acoustique et outils utilisés

2.1 Principes et méthodes informatiques en acoustique
2.2 Etude des qualités / défauts de certains logiciels de prévision acoustique
2.2.1 Introduction
2.2.2 Epidaure
2.2.3 Raynoise
2.2.4 Odeon
2.2.5 Catt-acoustic
2.3 Conclusions

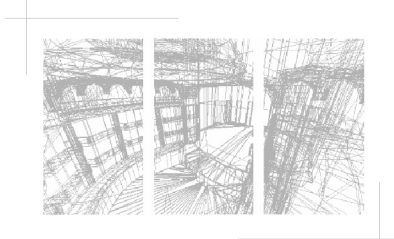
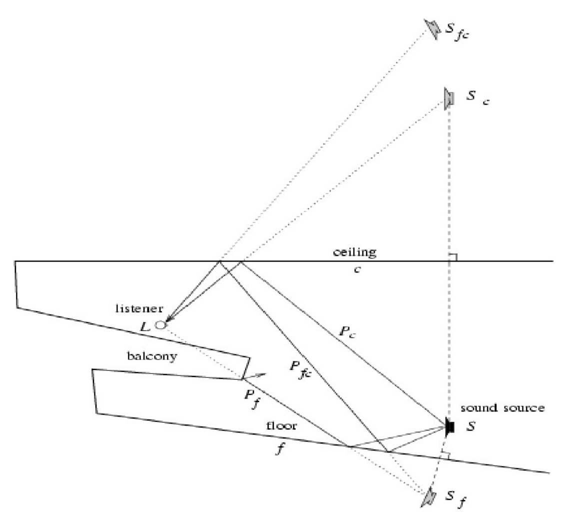
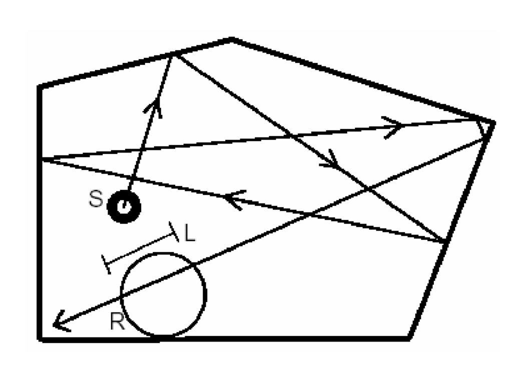


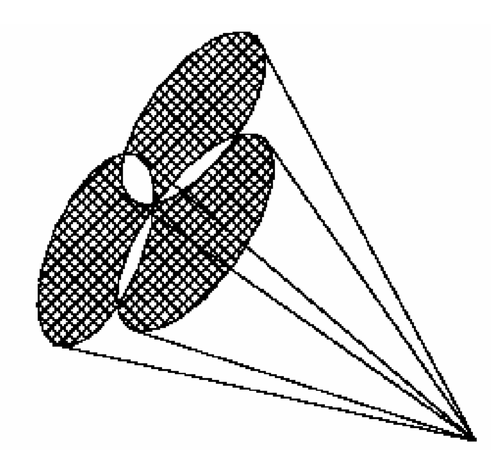
Tableau 2.1



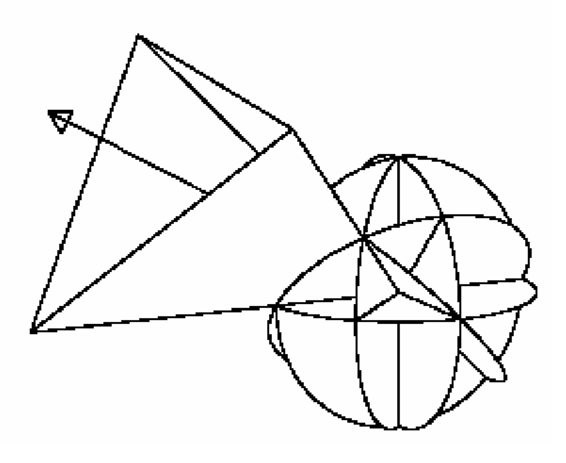
a. Schéma du principe de fonctionnement de la méthode des sources-images [Savioja, 1999]



b. Schéma conceptuel de l'algorithme de lancés de rayons [Farina, 1993]



c. Représentation graphique de la méthode des cônes [Farina, 1995b]



d. Représentation graphique de la méthode des pyramides [Farina, 1993]

2.1 Principes et méthodes informatiques en acoustique

Tous les modèles mathématiques actuels utilisés dans des programmes de simulation acoustique se basent sur des hypothèses de l'acoustique géométrique. C'est à dire que l'énergie sonore se propage en suivant les mêmes lois de réflexion que l'optique géométrique. Par conséquent les méthodes informatiques utilisées en acoustique [Savioja, 1999] sont basées sur le principe de l'acoustique géométrique avec toutes les restrictions théoriques que cela impose. On distingue la méthode des « sources-images » (Mirror Image Source Method - MISM) [Cremer, 1982], celle de « lancés de rayons sonores » (Ray Tracing Method - RTM) [Kulowski, 1985], et des méthodes mixtes comme « la méthode des cônes » (Conical Beam Method - CBM) [Farina, 1995b] et « la méthode des pyramides » (Pyramid Tracing Method - PTM) [Farina, 1993], [Farina, 1995a].

La méthode des sources-images (Tableau 2.1a) est basée sur la théorie de propagation des rayons lumineux rencontrant une surface plane. La modélisation géométrique des réflexions dans cette méthode consiste à représenter l'onde réfléchie, non plus comme une onde provenant de la source originale après une réflexion sur une surface, mais comme une onde produite directement par une nouvelle source virtuelle, appelée aussi « source-image ». Les rayons sources créés à partir des sources-images, frappent à leur tour d'autres surfaces provoquant une deuxième génération de sources-images et ainsi de suite [Allen, 1979]. De cette façon on arrive à bien simuler la complexité des réflexions des rayons sonores dans l'espace tridimensionnel des surfaces planes ou des polyèdres plus complexes [Borish, 1984].

D'après la méthode de tirs de rayons (Tableau 2.1b) un grand nombre de rayons divergents est émis d'un point source de manière isotrope. Ces rayons se réfléchissent sur des parois qui absorbent une partie de leur énergie. A l'aide de cette méthode on arrive à calculer la densité d'énergie sonore dans un volume par rapport à des positions de récepteurs [Krokstad, 1968].

La méthode des cônes (Tableau 2.1c) se résume par la modélisation d'une source qui propage un grand nombre de cônes dans toutes les directions. Chaque cône s'élargit au fur et à mesure qu'il s'éloigne de la source. Lorsqu'un point de réception est situé à l'intérieur d'un cône entre 2 réflexions successives, une source-image est déterminée. L'avantage majeur de cette méthode, comparée à la théorie des sources-images, est de prendre en considération les phénomènes de diffraction et de diffusion [Drumm, 1999a] [Drumm, 1999b].

La méthode des pyramides (Tableau 2.1d) est basée sur le tracé de pyramides et non de cônes, comportant un triangle comme base. Cette méthode procure dans certains cas des résultats plus précis notamment dans l'analyse du champ direct [Farina, 1995b].

Toutes ces méthodes permettent de déterminer des critères mesurés à partir de la réponse impulsionnelle de la salle. Les programmes de simulation acoustique actuels s'appuient sur ces méthodes informatiques en intégrant dans leur calcul plusieurs algorithmes à la fois. Ceci leur permet de devenir de plus en plus performants en diminuant au maximum le temps de calcul et d'optimiser les résultats.

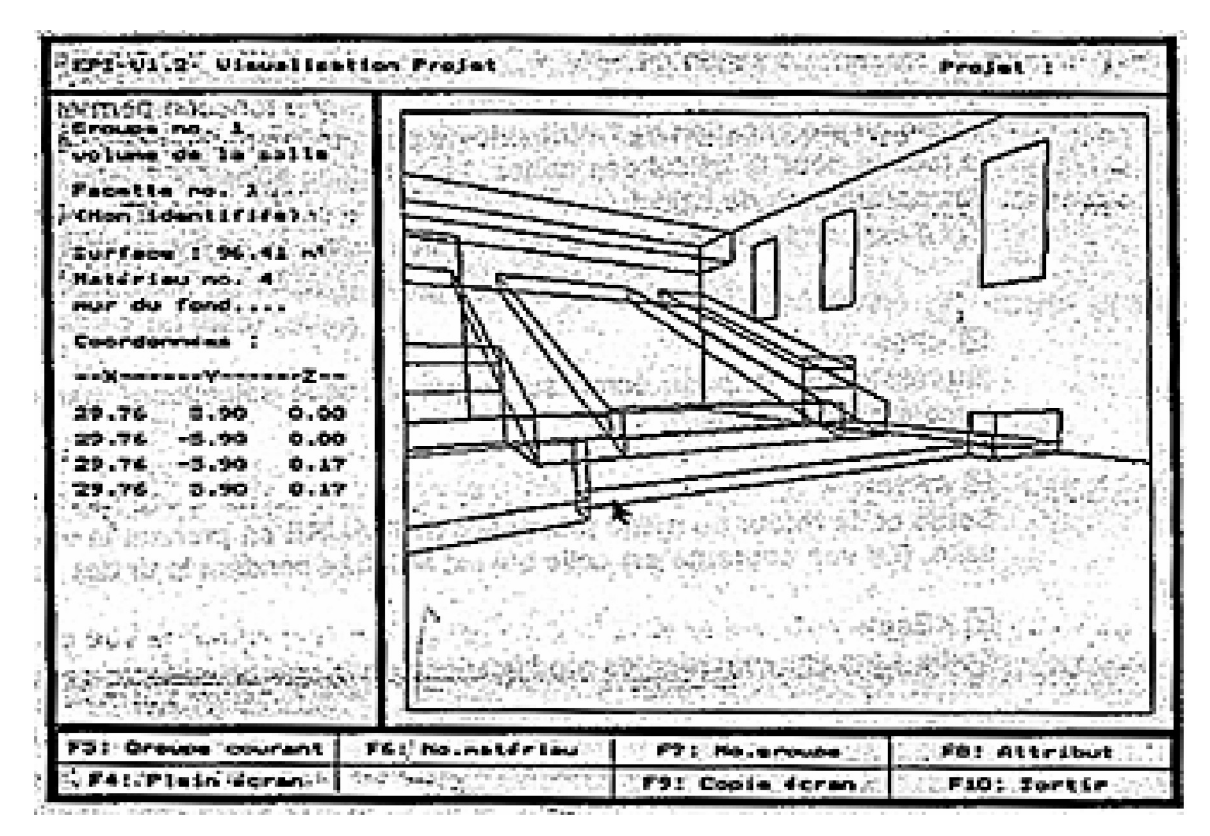
Tableau 2.2

EPIDAURE

```
! Commentaires…
GRP Nb de groupe ;
mat No ;
FAC   x     y     z      (cordonnées des points des facettes)

      "     "     "
      "     "     "
      "     "     "
```

a. Contenu de format de fichier général *.geo [Kouzeleas, 1997]



b. Mode de visualisation sur Epidaure [Epidaure, 1992]

2.2 Etude des qualités / défauts de certains logiciels de prévision acoustique

2.2.1 Introduction

Cette étude concerne certains logiciels de simulation acoustique du marché. L'analyse des caractéristiques de ces logiciels est faite plus d'un point de vue architectural et informatique (modélisation, interfaces graphiques et informatiques, ergonomie d'utilisation, analyse du code informatique de la géométrie de la salle, etc...) que d'un point de vue de qualité des résultats acoustiques et de la puissance du calcul. Cette approche est plutôt introductive, car l'objectif n'est pas de démontrer tous les paramètres acoustiques de ces logiciels mais justement de :

- décrire des interfaces existantes permettant la communication avec des outils de modélisation architecturale, et
- soulever un manque éventuel d'adéquation des données acoustiques avec celles de la modélisation architecturale d'où la nécessité d'adaptation d'un processus de modélisation en vue de la simulation acoustique.

Cette analyse porte sur les logiciels Epidaure, Raynoise, Odeon et Catt-Acoustic.

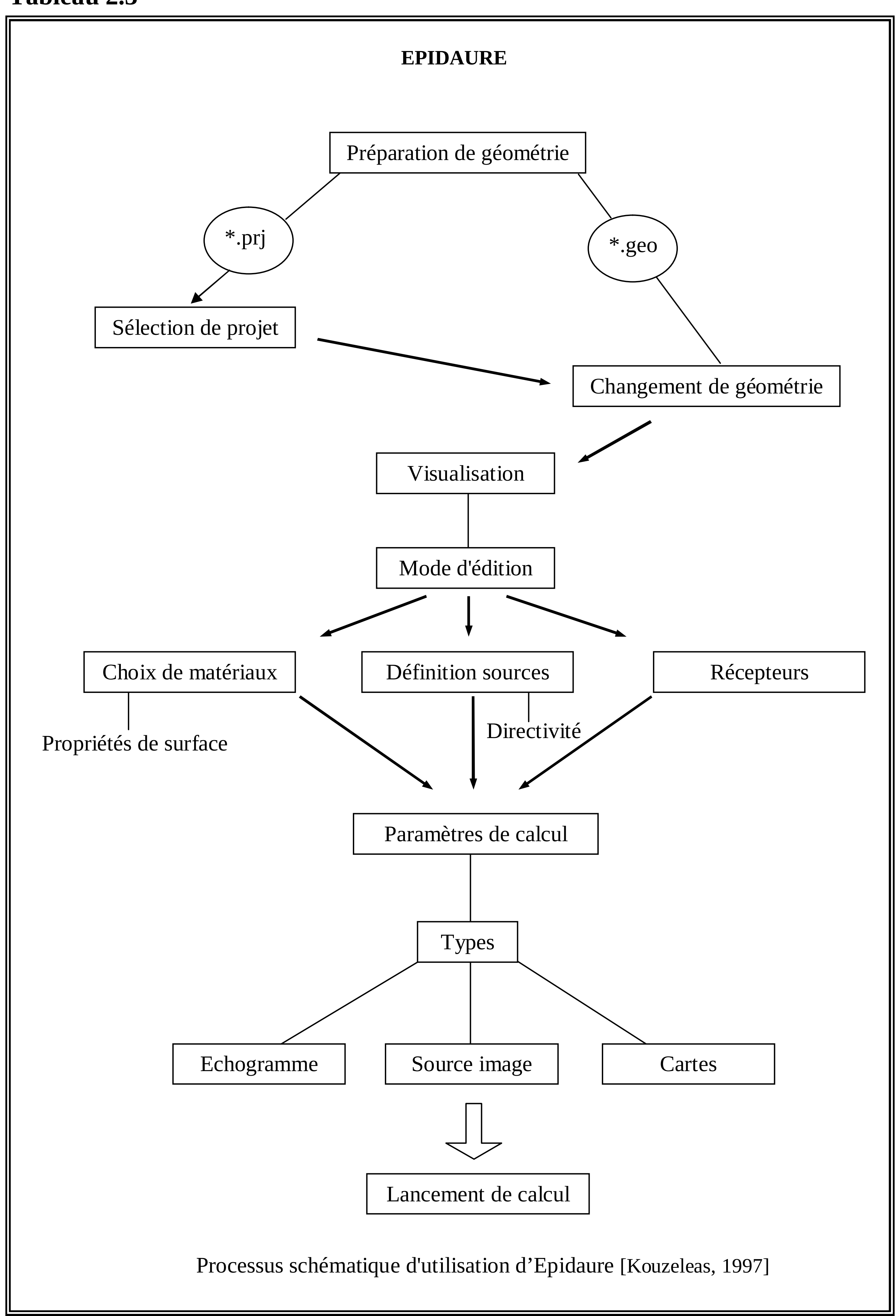
2.2.2 Epidaure

Epidaure est un des premiers logiciels développés uniquement pour l'acoustique des salles. Il est basé sur des hypothèses de l'acoustique géométrique et depuis sa création un module d'auralisation a été mis au point (Ebinaure).

Analyse de la géométrie

Chaque géométrie modélisée, provenant d'un logiciel de modélisation doit se transformer en format **.geo*, afin d'être « lisible » par Epidaure. La géométrie complète d'un espace, ne doit pas dépasser 2.500 facettes, faisant chacune référence à un matériau défini. Chaque matériau est caractérisé par un nom, par un coefficient d'absorption par bande d'octave de 125Hz à 4kHz. Au maximum, 20 matériaux sont possibles dans un fichier « projet » Epidaure. Toutes les facettes sont réunies en groupes. Il y a au maximum 25 groupes de 100 facettes dans une géométrie Epidaure. La géométrie de la salle se trouve dans un fichier d'extension **.geo*. Il s'agit d'un fichier texte ASCII où sont données toutes les cordonnées de chaque surface de manière particulière (Tableau 2.2a). Puisque Epidaure n'accepte pas d'autre format de fichier, il faut utiliser un fichier exécutable qui transforme chaque fichier d'échange **.dxf* en fichier **.geo* afin de récupérer et visualiser la géométrie de la salle [Epidaure, 1992].

Tableau 2.3



Processus schématique d'utilisation d'Epidaure [Kouzeleas, 1997]

Ergonomie

Ce logiciel fonctionne sous environnement DOS et Windows (dernière version), au niveau d'entrée des données. On accède à des fonctions à partir des menus déroulants traditionnels. Le long processus d'insertion de la géométrie sur le logiciel (cf. chapitre 4.2, chap.7.1.3.3) d'un côté et la difficulté d'apport des caractéristiques des matériaux à des surfaces ainsi que la mauvaise gestion au niveau de la visualisation et élaboration de la géométrie, de l'autre, rend l'ergonomie du logiciel assez problématique (Tableau 2.2b).

Le processus d'utilisation d'Epidaure passe par la sélection d'un fichier projet **.prj* qui va contenir toutes les informations du calcul comme la géométrie, les matériaux, les récepteurs, les sources et les calculs. Dans un deuxième temps et après avoir chargé la géométrie, on définit des paramètres comme les matériaux des surfaces, et les coordonnées des sources et des récepteurs. A la fin on définit les paramètres du calcul courant de type « Echogramme », « Source image » et « cartes » [van Maercke, 1993] avant lancer le calcul final (Tableau 2.3).

2.2.3 Raynoise

Le champ d'application de Raynoise se trouve plutôt dans les domaines du contrôle de bruit industriel et de la prévision acoustique des salles ainsi que de l'impact des bruits environnementaux tels les bruits des usines, aéroports, gares et autoroutes sur le réseau urbain. Raynoise est un programme hybride basé sur les « sources-images » et les « tirs de rayons ». Sa première méthode de calcul concerne les tirs de rayons coniques (« conical raytracing ») et la deuxième méthode concerne la « méthode de pyramide » (« discretized pyramids ») [Vorlander, 1995].

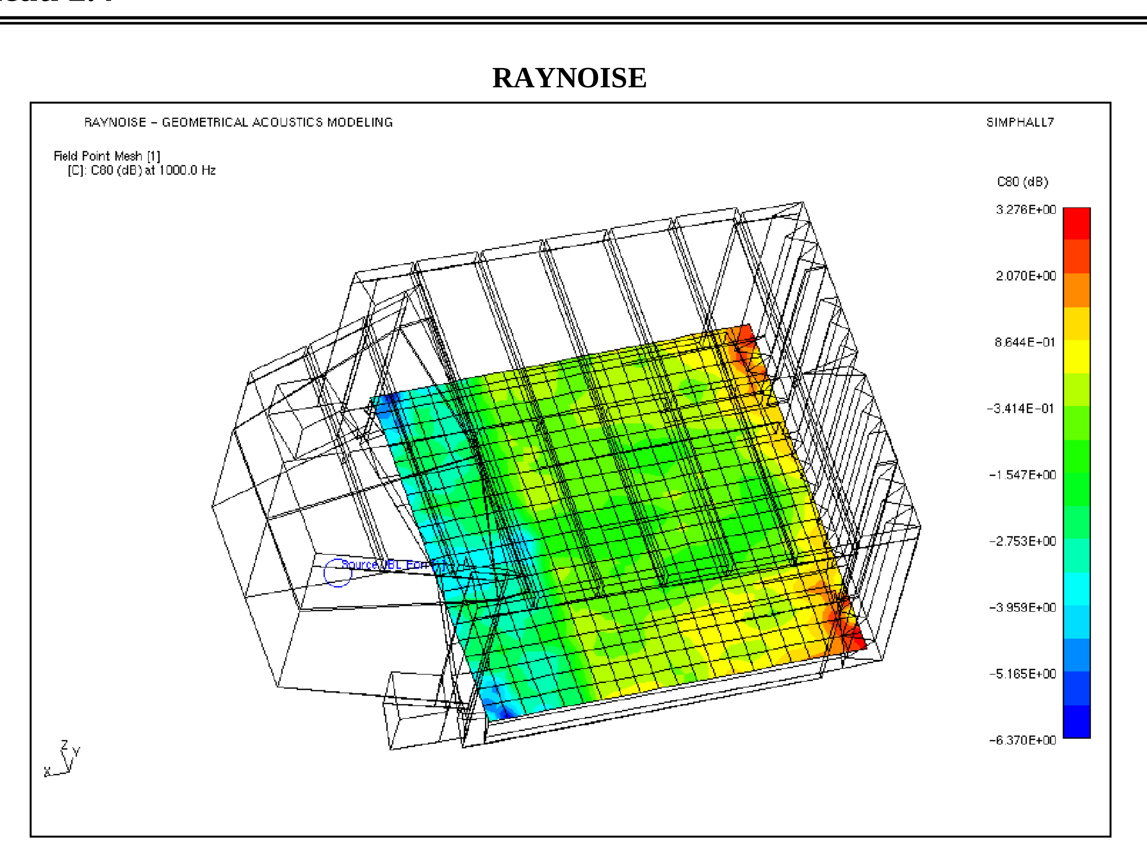
Analyse de la géométrie

Raynoise est un logiciel très puissant au niveau de son interface graphique (Tableau 2.5) et sa capacité d'importation des géométries complexes. Il accepte une géométrie d'un espace ouvert ou couvert modélisé à partir d'un logiciel de modélisation en format d'échange **.dxf*. La géométrie de cet espace introduit est illimitée au niveau du nombre des facettes [Smith, 2001]. Chaque surface est liée à un matériau défini par un coefficient d'absorption par bande d'octave entre 63Hz et 8khz et ne doit pas être constituée de plus de 20 points.

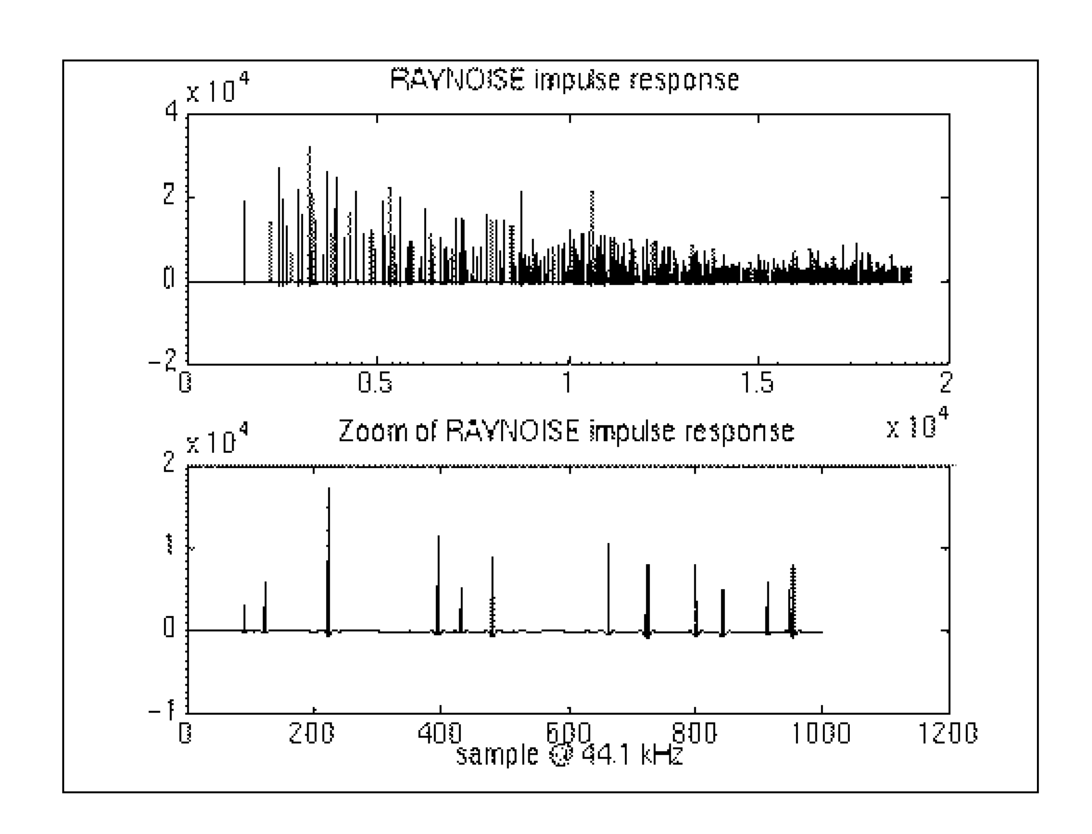
Raynoise supporte un langage des macro-commandes RCL (Raynoise command langage) qui facilite son interfaçage surtout en ce qui concerne des opérations de mode batch de calcul. On a possibilité aussi d'enregistrer des séquences de commande dans un fichier d'extension **.cmd* et de les exécuter à une seule opération afin de créer des fichiers de démonstration du comportement acoustique de l'espace.

Tableau 2.4

RAYNOISE



a. Répartition du niveau sonore de la géométrie sur Raynoise [Smith, 1998]



b. Visualisation de réponse impulsionnelle sur Raynoise [Smith, 2001]

Le nombre des rayons émis par une source se lève à 2000 et « l'ordre de réflexion » (nombre de rebondissement par rayon) est 20 réflexions. Le temps de propagation est 2000 millisecondes et le niveau sonore auquel le rayon de propagation s'arrête est 70 dB [Smith, 2002].

Ergonomie

Raynoise utilise l'environnement Windows comme plate-forme de fonctionnement avec toute la souplesse et la flexibilité que cela représente au niveau ergonomique. Son principe de fonctionnement ressemble à celui d'un autre logiciel présenté plus loin (Catt-acoustic) au niveau de l'extraction des résultats et de gestion de l'élaboration ultérieure. Il est basé sur un mode de rentrée des données bien détaillé en appuyant sur la fonctionnalité d'avant garde de regroupement-sélection des « sets » des données qui définissent de manière automatique et très ergonomique cette phase de rentrée de données (sources, récepteurs, microphones, surfaces réceptrices, éléments) et d'apport des caractéristiques.

Pendant cette étape, des opérations de sélection comme « union - intersection – différence » sont possibles. Raynoise se sert d'une base graphique très puissante afin de simuler et analyser les résultats du calcul et du comportement acoustique de façon « attirante » et efficace à la fois (Tableau 2.4). Enfin, le fonctionnement ergonomique de Raynoise (Tableau 2.5) appuie aussi sur l'identification correcte des « groupes (sets) » de sélection qui est un outil qui facilite énormément le processus de son utilisation.

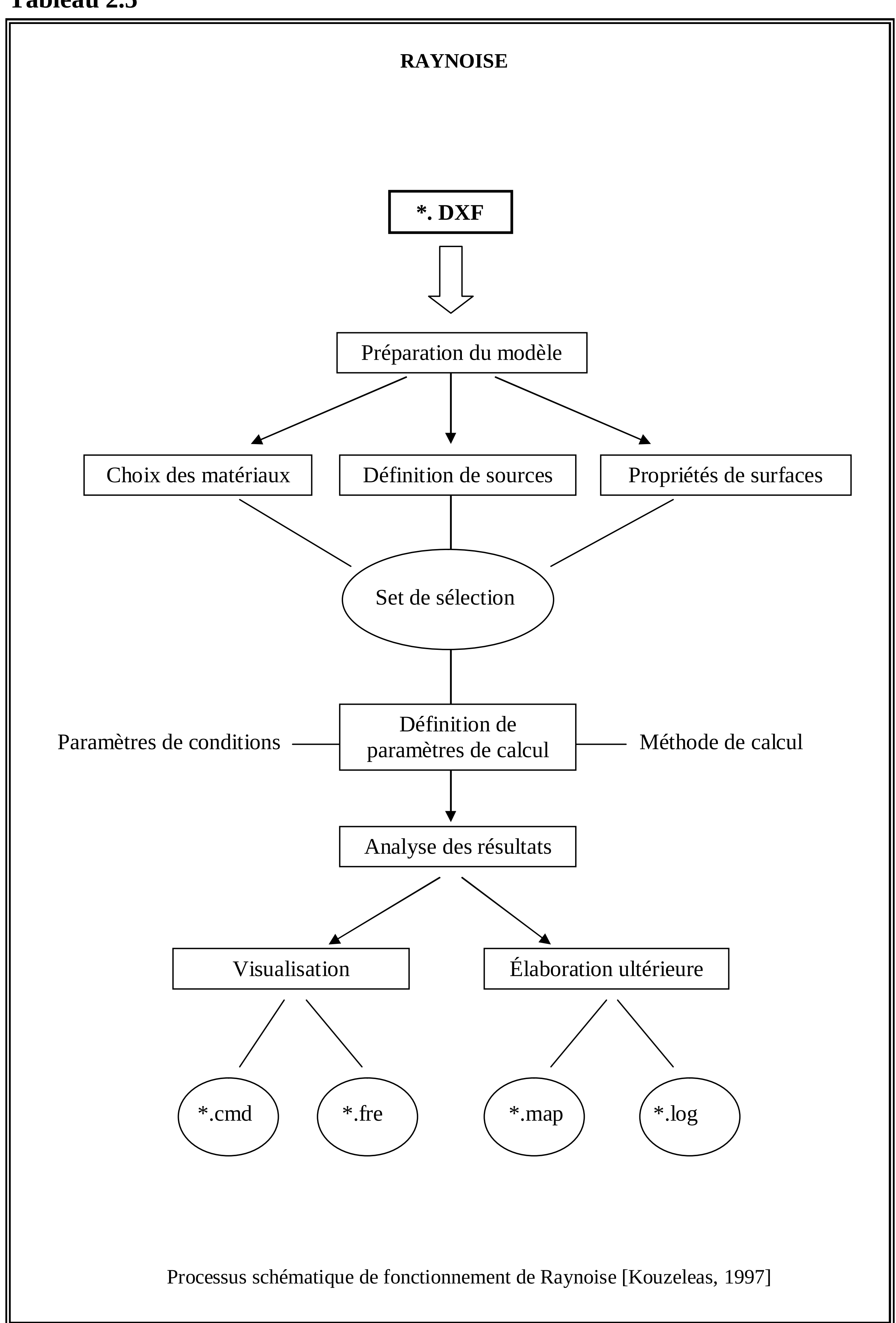
2.2.4 Odeon

Odeon est un logiciel de prévision des conditions acoustiques dans des salles en appuyant lui aussi sur un nombre des critères objectifs [Christensen, 1999] [Christensen, 2001] [Naylor, 1992]. Les différentes versions du logiciel (« auditorium edition - industrial edition – combined edition»), s'expliquent du nombre des critères objectifs à calculer et des spécificités liées à l'environnement industriel (ex : échelle, type de sources, etc...). Un certain nombre des paramètres inclus sur ce logiciel permettent aussi d'évaluer les conditions acoustiques sur des plate-formes d'orchestres ainsi que de générer ou accepter des fichiers sonores pour auralisation [Rindel, 1994].

Analyse de la géométrie

La géométrie de la salle se place dans un fichier d'extension **.sur*. Il s' agit d'un fichier texte ASCII où sont passées toutes les coordonnées de chaque surface de manière particulière (Tableau 2.6a). Le logiciel accepte l'importation des fichiers de géométrie de formats d'échange **.dxf*. Odeon dispose un langage de modélisation paramétrique qui permet de « fabriquer » de manière informatique et non graphique à travers du code informatique (« script ») des géométries en format **.par* [Lynge, 2001b]. Ces géométries modélisées sont obligatoirement limitées au niveau de leur complexité car cette modélisation n'est pas

Tableau 2.5



Processus schématique de fonctionnement de Raynoise [Kouzeleas, 1997]

graphique. Le logiciel dispose d'un outil de vérification et de détection des surfaces inadéquates au calcul comme les surfaces gauches, dupliquées, manquées, etc…

La géométrie modélisée ne doit pas dépasser plus que 10000 facettes de 500 points au maximum par surface, faisant chacune référence à un matériau défini. Chaque matériau est caractérisé par un nom, par un coefficient d 'absorption par bande d'intervalle 125Hz à 4khz. Au niveau de la visualisation de la géométrie on a la possibilité de sauvegarder plusieurs vues différentes et les faire apparaître chaque instant à partir de l'option « View Model ».

Ergonomie

ODEON fonctionne sous environnement Windows et il supporte l'ouverture simultanée des fenêtres pour comparer les résultats (Multiple document interface-MDI). L'affectation des matériaux à des surfaces et la définition des sources et récepteurs se fait à travers des interfaces graphiques amicales et en 3D (Tableau 2.6b). On retrouve le menu traditionnel sous forme des icônes horizontales pour accéder en suite à des différentes options. La manière dont le logiciel est monté, minimise le temps du calcul quand les paramètres changent, mais par conséquent les dépendances des données sont plus fortes (Tableau 2.7).

2.2.5 Catt-acoustic

Catt-acoustic est un outil d'analyse du comportement sonore d'un espace et d'auralisation [Dalenback, 1996a]. Il s'appuie lui aussi sur le principe de l'acoustique géométrique, en prenant en compte en même temps un certain nombre des critères objectifs acoustiques [Dalenback, 1996b]. Il s'agit d'un programme hybride, dont le module de prédiction utilise les « sources-images » les « lancés de rayons » et la « méthode des cônes ».

Analyse de la géométrie

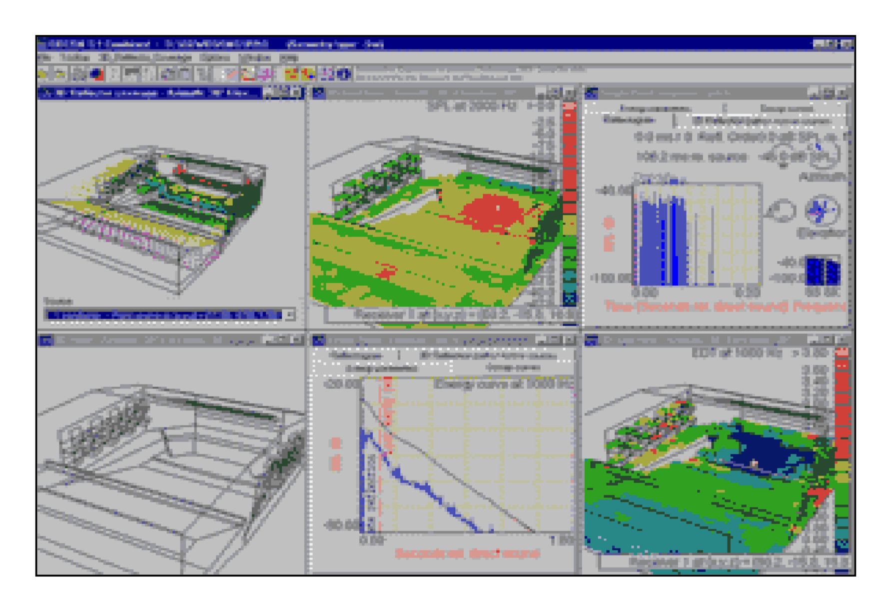
La géométrie se trouve dans un fichier d'extension **.geo* qui est un fichier texte ASCII, qui se crée dans un éditer de texte intégré dans le logiciel, à un format bien particulier. Ce format **.geo* de Catt-acoustic est différent du format **.geo* d'Epidaure. Comme sur Odeon, il y a deux façons « traditionnelles » de faire rentrer la géométrie dans le logiciel. La première consiste à passer par l'intermédiaire d'un programme spécifique (fait en langage AutoLISP) qui met en oeuvre l'interface entre AutoCAD et Catt-acoustic. De cette façon on arrive à faire rentrer une géométrie AutoCAD sur Catt-acoustic. Chaque facette correspond à un matériau d'un coefficient d 'absorption et de diffusion par bande d'intervalle 125Hz - 4kHz.. La deuxième est d'éditer la géométrie dans l'éditeur intégré du logiciel, en y définissant toutes les coordonnées des facettes ainsi que les matériaux. En parallèle un autre moyen de faire rentrer la géométrie d'une salle consiste à se servir du processus de la récuperation de toutes les cordonnées de chaque facette de la géométrie à l'aide d'un autre logiciel acoustique (ex : fichier **.geo* d'Epidaure) et les « adapter – ajuster », à l'aide d'un traitement de texte, de manière efficace et précise en format de géométrie **.geo* sur Catt-acoustic, (Tableau 2.8a). Le nombre des sources est de l'ordre de 260 et des récepteurs de l'ordre de 1000.

Tableau 2.6

ODEON

1ere partie	*Commentaires... (Nb de lignes illimité)*
# # #	
2me partie	*Coordonnées des coins des surfaces (en mètres)*
	No de coin x y z
	" " " "
	" " " "
	" " " " .
# # #	
3me partie	*Commentaires...(Nb de lignes illimité)*
# # #	
4me partie	*Apport des coins à des surfaces*
	No de surface Description (=< 40 caractères)
	Nb des coins de la surface No_1-coin .... No_N -coin
	" " "
	" " "
# # #	
5me partie	*Commentaires...(Nb de lignes illimité)*
# # #	
6me partie	*Description des coins des lignes sur des plans*
	Nb des coins en x-y en x-z en y-z
	Coin No_1 ... No_N (plan x-y)
	Coin No_1 ... No_N (plan x-z)
	Coin No_1 ... No_N (plan y-z)

a. Contenu de format de fichier général *.sur [Kouzeleas, 1997]



b. Ouverture simultanée des fenêtres pour comparer les résultats sur Odeon [Odeon, 2002b]

Ergonomie

L'environnement sous lequel fonctionne Catt-acoustic est Windows. Son fonctionnement s'appuie sur le principe des modules-applications séparés qui communiquent avec le programme principal à travers « windows-boxes » qui s'activent dans le menu déroulant « window » de Catt-acoustic. Ces modules-applications concernent :

- la gestion de la géométrie et des fichiers-(module Prédiction)
- la gestion de la visualisation (géométrie-cartes)-(module plot-file viewer)
- les rentrées des données
- la directivité des sources (module directivité)
- les propriétés des surfaces (module surfaces properties)
- les types des sources (module multiple sources)
- la gestion de l'élaboration ultérieure des réponses impulsionnelles (module post processing)
- la gestion du regroupement du calcul (module séquence processing)

Catt-acoustic possède un module de directivité des sources très élaboré [Catt-Acoustic, 2002]. Les trois types de directivités concernent :

- Le type SD2 basé sur le module « 32-bit DLL Directivity Interface » (DDI) qui offre un réseau de modélisation de très haute résolution (niveau de précision de plus de 10 degrés),

- Le type SD1 basé par interpolation sur le standard industriel de 10 degrés de niveau de précision et enfin,

- Le type SD0 basé par interpolation de 15 degrés en horizontal et vertical des diagrammes polaires. (fig. 1)

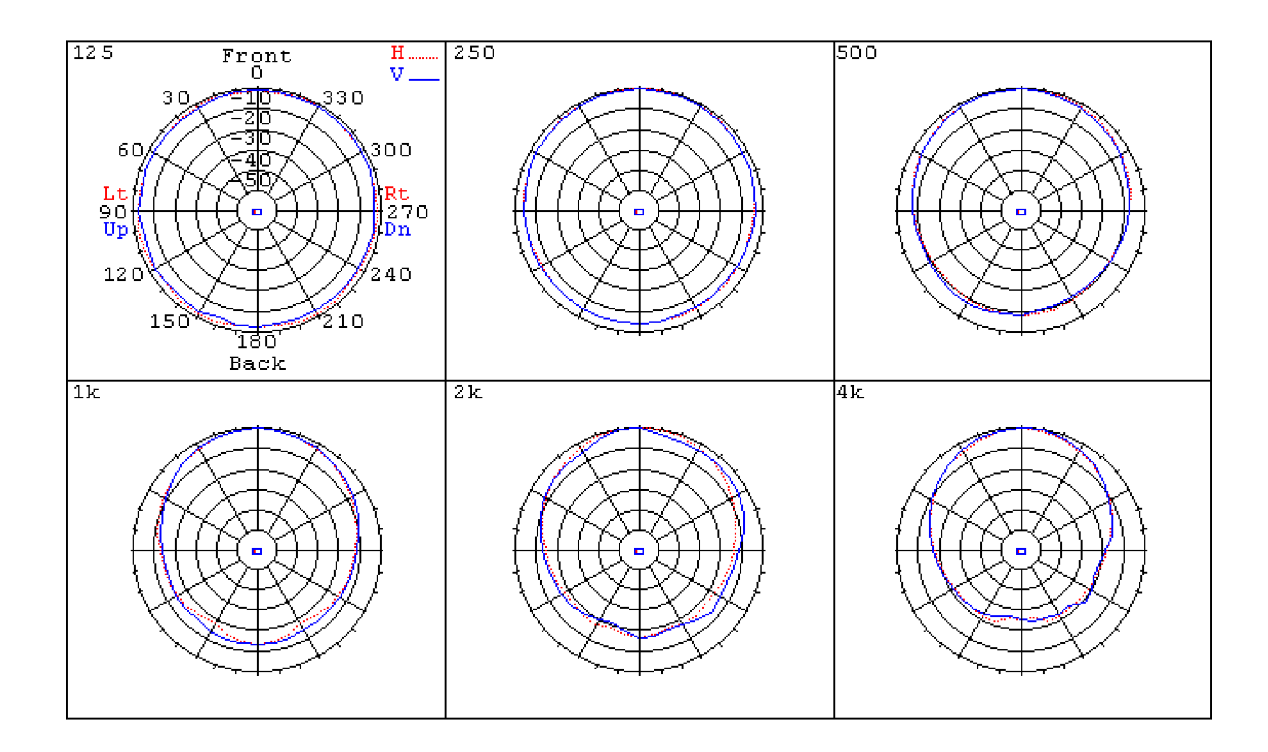
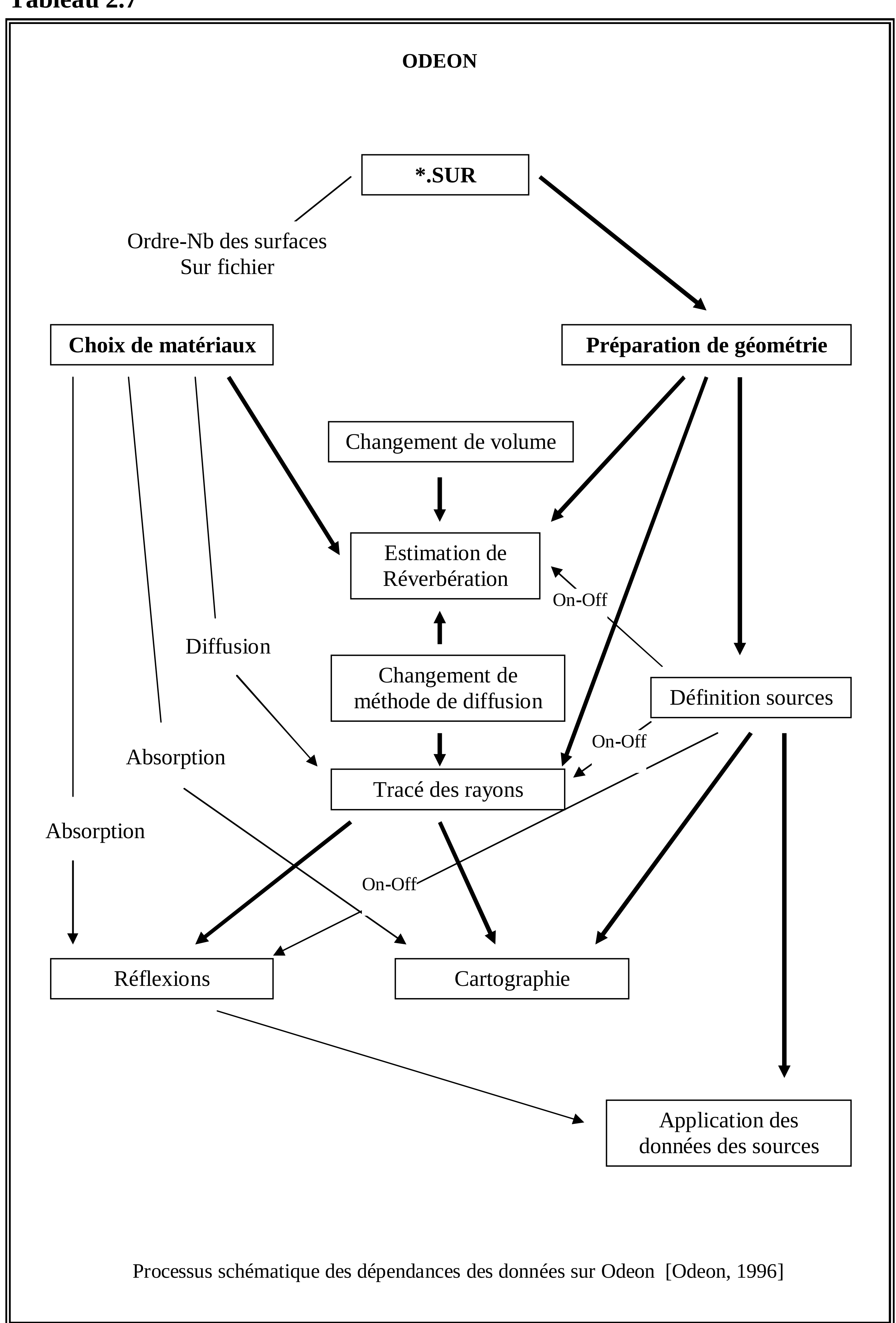


Fig. 1 - Diagrammes polaires de directivité des sources par fréquence
sur Catt-Acoustic [Catt-Acoustic, 2002]

Tableau 2.7



Processus schématique des dépendances des données sur Odeon [Odeon, 1996]

Catt-acoustic s'appuie sur un mode de visualisation « plot-file viewer » très puissant qui lui permet de simuler un grand nombre des critères de manière précise à partir d'un module externe d'un « viewer » intégré sur le logiciel. Ce module permet au logiciel d'étendre son interface graphique à une exportation des résultats en formats images « metafiles » *(*.wmf*) et « encapsulated postscript » (**.eps*) [Catt-Acoustic, 1996].

Cette option des modules d'un coté rend au logiciel une certaine puissance au niveau de calcul en prenant en compte un grand nombre des paramètres, mais de l'autre coté le rend moins ergonomique au niveau de l'utilisation et de rentrée des données comme la géométrie (**.geo*), les coordonnées des récepteurs (**.loc*) et des sources (**.loc*) et beaucoup d'autres (Tableau 2.9).

2.3 Conclusions

Les programmes de simulation acoustique d'aujourd'hui ouvrent de nouvelles perspectives d'exploitation et de recherche dans le domaine de l'acoustique. La prise en considération d'un grand nombre de paramètres physiques (critères objectifs) et l'intégration d'algorithmes puissants et rapides font de ces logiciels, des outils de calcul acoustique extrêmement efficaces.

La puissance évidente et l'amélioration progressive de ces programmes se situent sur plusieurs niveaux :
- Depuis certaines années ces logiciels ont fait un progrès considérable surtout au niveau ergonomique. Grâce à la programmation graphique « des objets orientés », ces aspects ergonomiques portent sur :
  - le passage progressif de l'environnement DOS à l'environnement graphique (ex : Odeon)
  - la saisie des données avec la visualisation simultanée des graphiques impactées,
  - l'extraction graphique de tout résultat acoustique exploitable,
  - le mode de visualisation (« rendering ») de la géométrie.

- La prise en compte d'un certain nombre d'améliorations techniques dans le calcul acoustique donne des résultats plus riches et corrects. Ces améliorations techniques portent sur :
  - l'intégration des types de directivité des sources,
  - la prise en compte de la réflexion diffuse en parois,
  - l'utilisation des modules multiples des sources sonores,
  - les interfaces informatiques et les fichiers d'échange avec des logiciels de modélisation,
  - l'élaboration ultérieure des résultats acoustiques,
  - l'automatisation du calcul acoustique (« post script »),
  - la puissance du calcul au niveau mémoire et code informatique.

Néanmoins, on peut déjà remarquer qu'ils font appel à un vocabulaire technique destiné à des acousticiens qui reste peu compréhensible pour le monde des architectes qui sont

Tableau 2.8

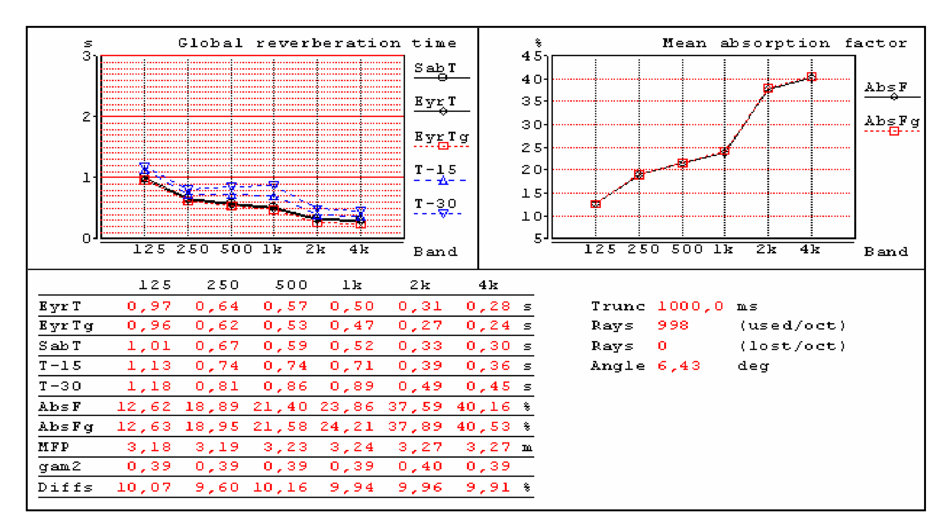
CATT-ACOUSTIC

```
; commentaires
ABS  nom du matériau  = < 10 20 25 30 30 30> ( coefficients % )
ABS  nom du matériau   = < 1 1 2 3 3 3>( coefficients % )
   " "             .
   ""              .

CORNERS   (description des coins de surfaces)
No de coin      x        y        z
No de coin      x        y        z
    "    "          "        "
    "    "          "        "

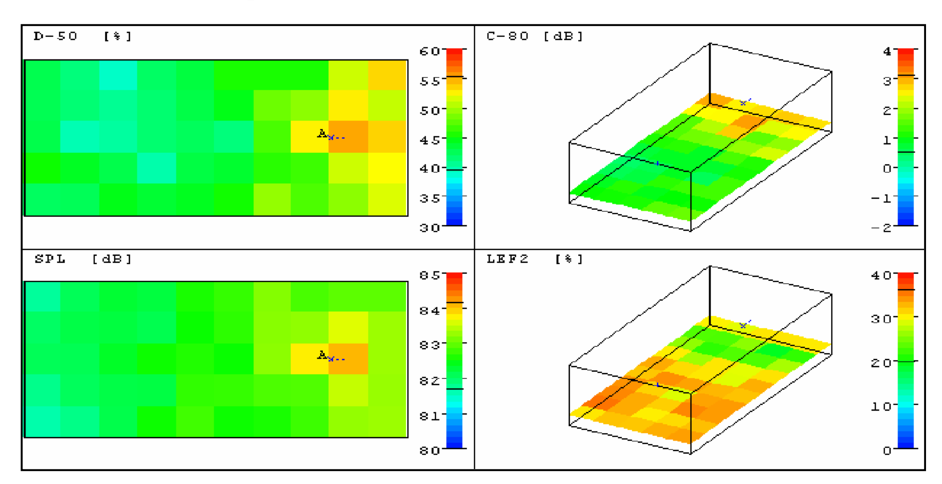
PLANES ( description des surfaces )
[No de surface   nom de surface / No-coin1....No-coinN / nom de matériau]
[No de surface   nom de surface / No-coin1....No-coinN / nom de matériau]
[       "          "  /          "          /          "          ]
[       "          "  /          "          /          "          ]
```

a. Contenu de format de fichier général *.geo sur Catt-acoustic [Kouzeleas, 1997]



	125	250	500	1k	2k	4k	
EyrT	0,97	0,64	0,57	0,50	0,31	0,28	s
EyrTg	0,96	0,62	0,53	0,47	0,27	0,24	s
SabT	1,01	0,67	0,59	0,52	0,33	0,30	s
T-15	1,13	0,74	0,74	0,71	0,39	0,36	s
T-30	1,18	0,81	0,86	0,89	0,49	0,45	s
AbsF	12,62	18,89	21,40	23,86	37,59	40,16	%
AbsFg	12,63	18,95	21,58	24,21	37,89	40,53	%
MFP	3,18	3,19	3,23	3,24	3,27	3,27	m
gam2	0,39	0,39	0,39	0,39	0,40	0,39	
Diffs	10,07	9,60	10,16	9,94	9,96	9,91	%

b. Simulation du Temps de Réverbération sur Catt-acoustic [Catt-Acoustic, 2002]



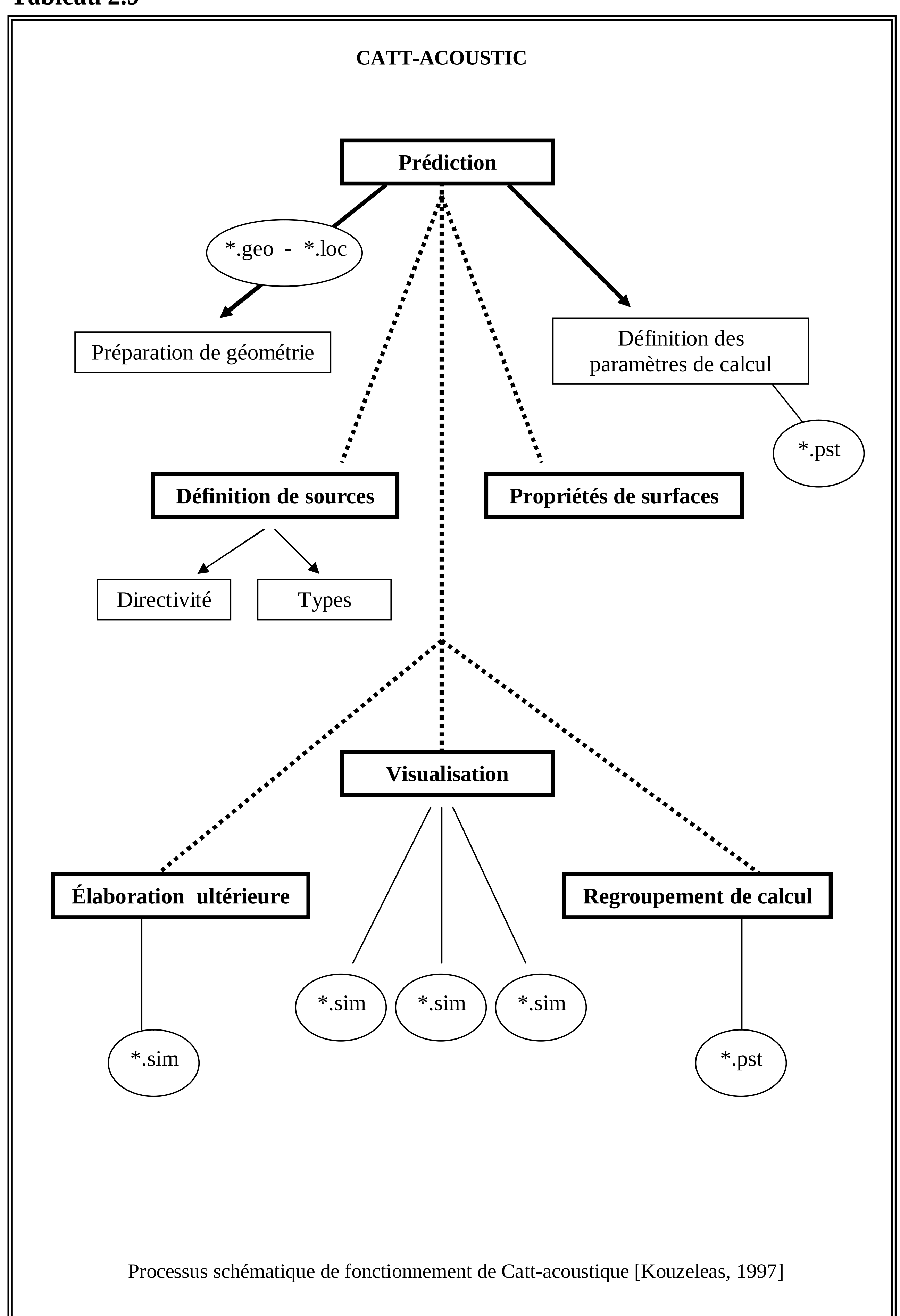
c. Simulation simultanée des différents critères objectifs sur Catt-acoustic [Catt-Acoustic, 2002]

parmi les protagonistes de ce « scénario acoustique ». Leur philosophie « cartésienne » de fonctionnement révèle un manque au niveau d'une approche purement architecturale et d'une réflexion adaptée au processus de conception architecturale d'un espace acoustique. La quasi-totalité de ces outils informatiques est basée sur un environnement graphique très puissant sans pourtant pouvoir intégrer une modélisation géométrique « chargée » et riche en éléments architecturaux, comme souvent c'est le cas en réalité. Cela amène à une transformation ou au pire des cas, à une déformation de l'espace architectural. La nécessité d'adaptation de l'espace au principe du fonctionnement d'un logiciel de simulation acoustique pendant sa phase de conception et vice versa, est une chose évidente. L'ergonomie de ces outils n'est pas encore adaptée aux besoins d'une pratique interactive. La difficulté d'entrée des données de manière interactive (modélisation du modèle, affectation des matériaux, etc...) et l'impuissance de l'élaboration de la géométrie en temps réel et en mode de visualisation, sont des inconvénients majeurs.

Actuellement ces programmes de simulation acoustique se rapprochent beaucoup plus des outils de validation de qualité acoustique que de prévision acoustique. Le calcul acoustique arrive à l'aboutissement d'un processus de modélisation et de conception architecturale. Cette intervention tardive ne peut que « *valider* » la conception acoustique car toute la modélisation et les dispositions acoustiques du modèle sont prédéfinis auparavant de manière interactive lors de la conception architecturale et acoustique, et l'élaboration architecturale du modèle inséré dans l'outil de simulation acoustique reste quasi inexistante.

Malgré leurs défauts, ces programmes de prévision acoustique restent des outils formidables qui apportent une puissance informatique nécessaire. Privilégier leur ergonomie à court terme et apporter à leur fonctionnement une adaptabilité et une prise en considération d'une « réflexion architecturale » à long terme sans que ce soit au détriment du reste, reste une priorité à amener avec prudence et efficacité.

Tableau 2.9



Processus schématique de fonctionnement de Catt-acoustique [Kouzeleas, 1997]

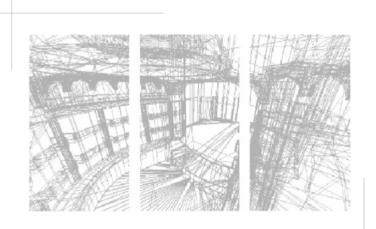
Chapitre 3

Outils d'aide de prévision acoustique et de modélisation architecturale



3. Outils d'aide de prévision acoustique et de modélisation architecturale

3.1 Introduction
3.2 Outils de prévision acoustique et modélisation
3.3 Outils de modélisation architecturale et calcul acoustique
3.4 Logiciels de simulation acoustique et logiciels de conception architecturale



3.1 Introduction

L'évolution des outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) ces dernières années a considérablement influencé les efforts vers des simulations de description détaillée et de modélisation de l'espace architectural. Ces outils actuels d'assistance au dessin, visent entre autre à la construction d'une maquette numérique, permettant la visualisation tridimensionnelle de l'espace concerné, dans le but de répondre à la fois à la problématique du processus de la conception architecturale et à l'évaluation des méthodes scientifiques mises en oeuvre sur des applications techniques particulières.

La simulation acoustique sur ordinateur consiste à présenter un environnement de simulation informatique de la propagation acoustique afin d'étudier, vérifier et optimiser le comportement acoustique pour pouvoir ensuite proposer des « solutions architecturales » de conception ou d'évaluation de l'espace. Le principe consiste à simuler la géométrie architecturale sous forme d'un « modèle numérique » constitué de facettes auxquelles sont associés des paramètres qui décrivent le comportement acoustique des parois (Tableau 3.2). Lorsqu'un certain nombre de données est établi, les programmes de simulation acoustique mettent en oeuvre des modèles physiques de la propagation acoustique afin de décrire la façon dont l'énergie se distribue au cours du temps et dans l'espace. Cela se fait à partir d'une présentation graphique des résultats sous forme de cartographies sonores ou de tableaux statistiques de valeurs de différents critères objectifs (Tableau 2.8b). Les algorithmes de calculs présentent des limitations dans la représentation des phénomènes physiques. L'ergonomie de ces logiciels n'est pas toujours évidente pour l'architecte et leur usage est plutôt destiné aux experts en acoustique.

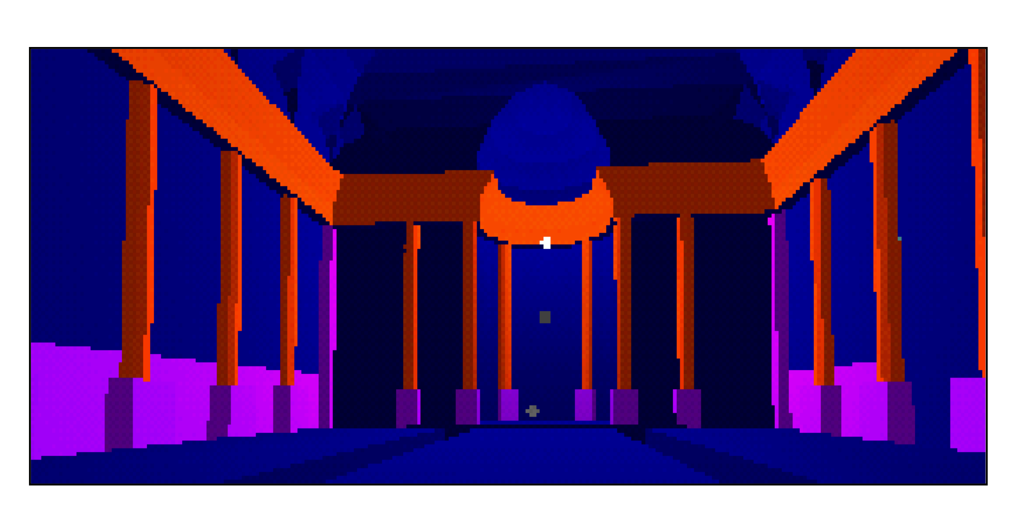
Ces programmes de simulation acoustique appliquent des méthodes et des techniques informatiques différentes afin d'évaluer la contribution énergétique dans l'espace. Les algorithmes utilisés dans ces méthodes s'appuient sur la théorie de l'acoustique géométrique et sur des fonctions statistiques à la fois. La prudence reste toujours au niveau de mise de l'évaluation et de l'interprétation des résultats provenant de différents logiciels.

Dans ce chapitre sont présentées les relations et les rapports des outils de simulation acoustique et de modélisation architecturale en fonction de leur finalité et de la population concernée. Sont également présentées les possibilités et les inconvénients de chacun de ces outils en fonction de leur complémentarité et de la nécessité de collaboration entre eux et de l'intégration dans la même interface.

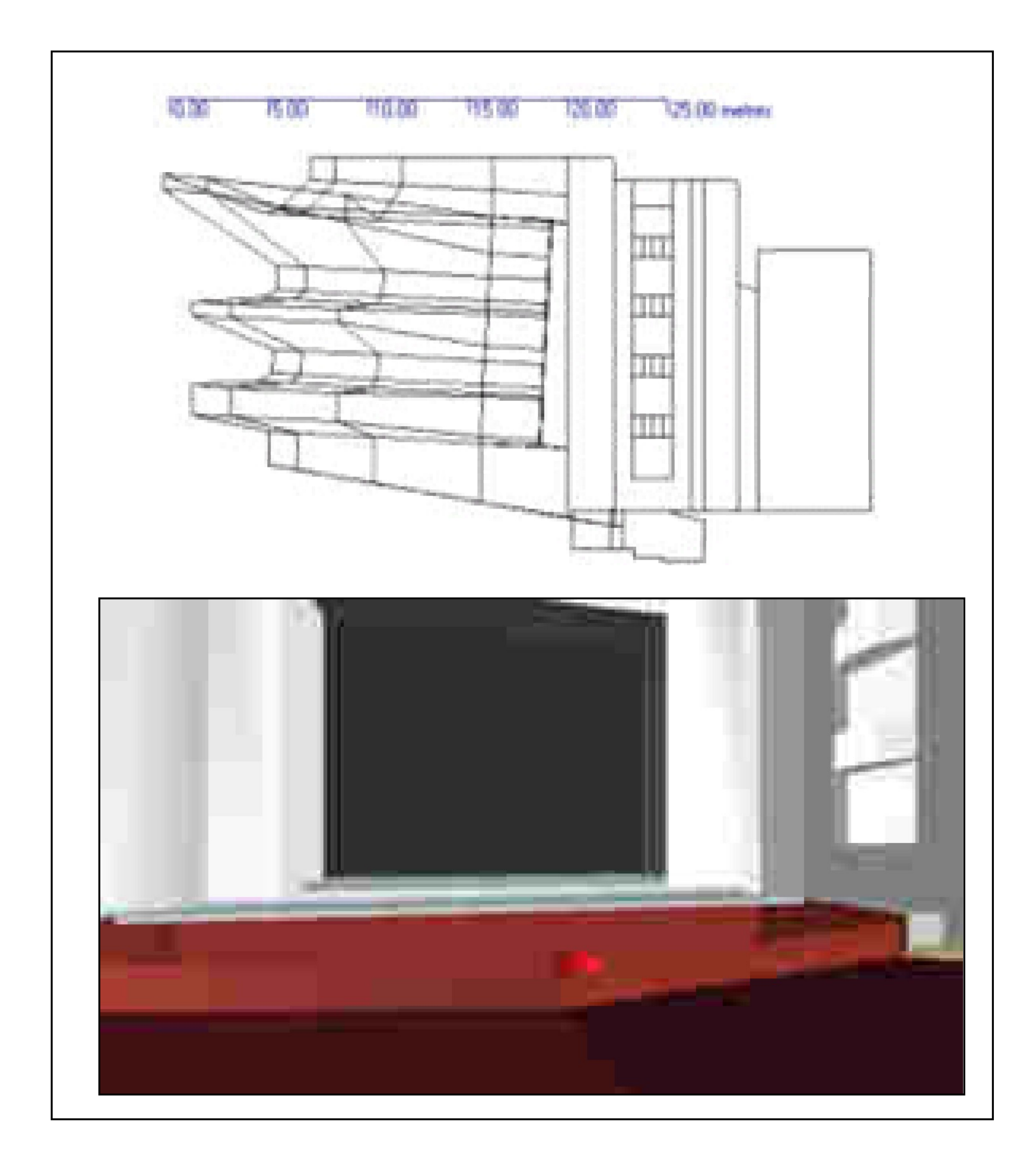
3.2 Outils de prévision acoustique et modélisation

Les outils de simulation acoustique actuellement utilisés sont de plus en plus performants au niveau puissance du calcul acoustique, ergonomie et interface avec des logiciels de modélisation architecturale. La plupart des logiciels de simulation acoustique intègrent des outils de visualisation tridimensionnelle de la géométrie extrêmement puissants, basés sur la technologie « OpenGL » [Odeon, 2002a] et qui font des rendus (« rendering »),

Tableau 3.1



a. Mode de visualisation ("rendering") de la géométrie sur Catt-Acoustic [Catt-Acoustic, 2002]



b. Mode de visualisation « filaire » et « rendu » de la géométrie sur Odeon [Odeon, 2002b]

des colorations des surfaces et des animations, en se rapprochant beaucoup des options de visualisation des logiciels de modélisation (Tableau 3.1).

L'interface informatique et l'échange des fichiers « géométrie » avec des logiciels de modélisation C.A.O. se fait de deux façons. La première façon consiste à passer surtout par le format d'échange « **.dxf* » (format d'exportation de géométrie conçu par AutoCAD et adapté pratiquement par tous les logiciels C.A.O.). Ce format comporte toutes les caractéristiques de la géométrie (coordonnées des surfaces, propriétés des couleurs, etc…) qui sont utilisées au maximum surtout par les logiciels de simulation acoustique qui intègrent des modules de visualisation performants (« rendering », animation, etc...).

L'inconvénient dans l'importation d'un fichier « **.dxf* » c'est que la géométrie doit être vérifiée et correctement conçue en vue de simulation acoustique (cf. chap.4.2 « Définition des phases du processus informatique de modélisation ») pour avoir des résultats fiables. La plupart des logiciels de simulation acoustique disposent des « vérificateurs de géométrie » qui repèrent l'inadéquation de la modélisation [Lynge, 2001a] (ex : « surface gauche ») soit en mode de visualisation (fig.2) [Christensen, 2001] soit en fichier texte ASCII (Epidaure).

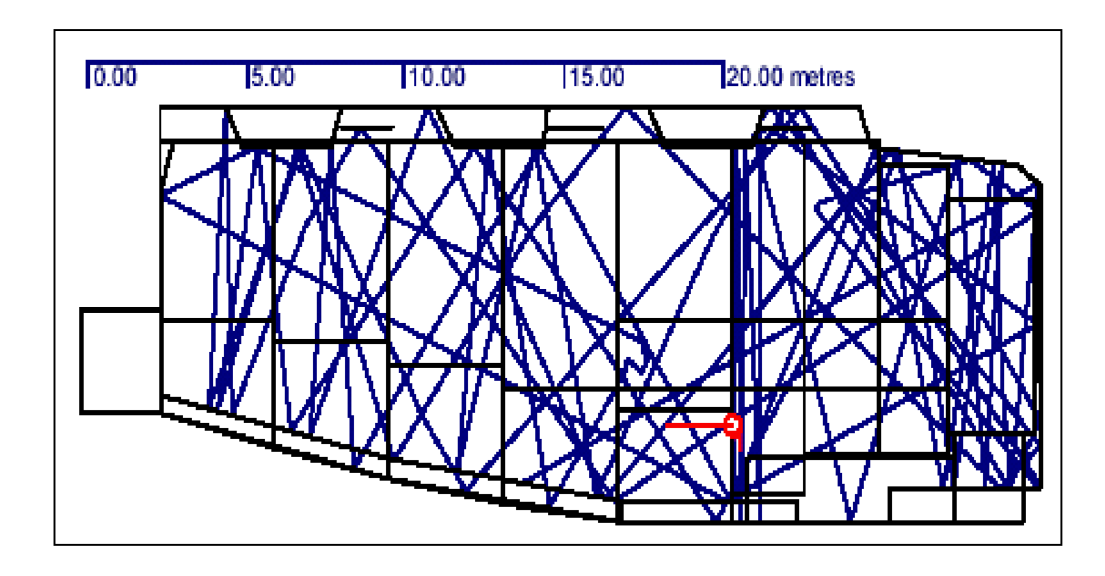
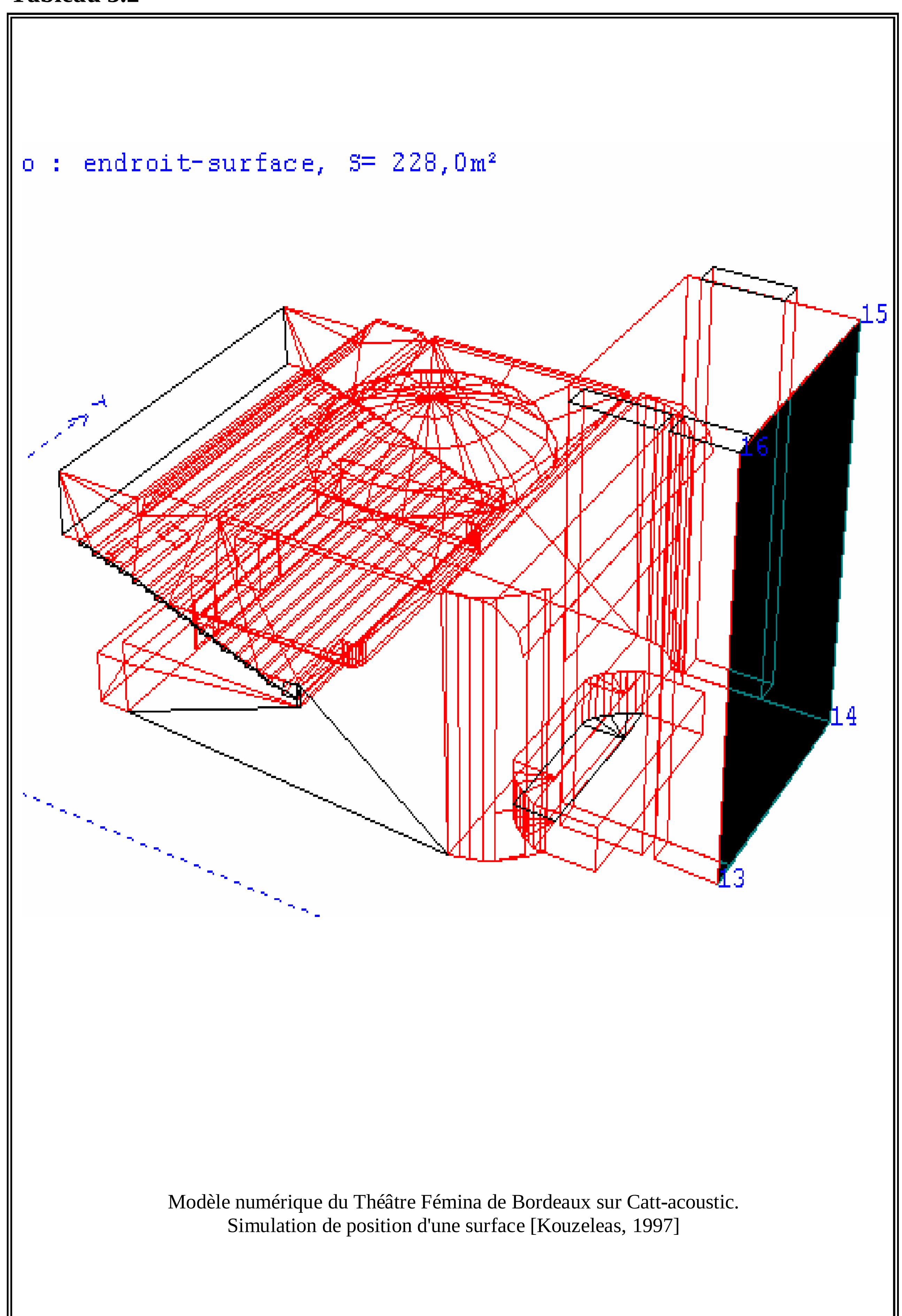


Fig. 2 - Vérification de la géométrie sur ODEON [Lynge, 2001a]

La deuxième façon consiste à passer par des configurations des fichiers des géométries, déjà modélisées ailleurs, propres à chaque logiciel (« **.sur* », « **.geo* », etc...). Il s'agit des fichiers ASCII qui comportent les coordonnées des surfaces planes. Ces fichiers sont générés par des interfaces intégrées dans chaque logiciel de calcul acoustique.

Actuellement, même si la visualisation de la géométrie sur un logiciel de calcul acoustique est très correcte (Tableau 3.3) [Catt-Acoustic, 2002], la modélisation de la géométrie reste quasiment inexistante. Certains logiciels (ex : Odeon) utilisent un code de programmation sous forme des « scripts » (regroupement de commandes-actions) en utilisant des variables et des transformations des cordonnées pour modéliser une géométrie [Lynge, 2001]. Ce procédé reste toujours très primaire et difficile à cause de sa complexité et le manque de l'interactivité lors d'une modélisation architecturale traditionnelle en C.A.O. Ce

Tableau 3.2



Modèle numérique du Théâtre Fémina de Bordeaux sur Catt-acoustic.
Simulation de position d'une surface [Kouzeleas, 1997]

manque de modélisation puissante interne dans un logiciel de calcul acoustique crée des problèmes de « communication » avec des logiciels C.A.O., d'inadéquation des données et du temps consommé. En fait ce manque de communication directe, avec des « aller-retour » permanents entre outils de simulation acoustique et outils de modélisation, fait qu'un logiciel de prévision acoustique devient plutôt un logiciel de « vérification » et de « correction » de l'acoustique et de la modélisation jusqu'à ce que la salle modélisée et corrigée corresponde aux résultats optimaux du calcul acoustique. La plate-forme proposée dans cette étude tente de répondre entre autre à cette problématique en rapprochant la conception architecturale pendant la modélisation et la conception acoustique dans le même environnement C.A.O. plus « parlant » pour les architectes.

3.3 Outils de modélisation architecturale et calcul acoustique

Avec l'évolution des logiciels de modélisation architecturale C.A.O. le champ d'action a été élargi, ce qui a permis le développement des applications techniques particulières intégrées sur des domaines diverses (mécanique, environnement, etc...). Des logiciels de simulation acoustique commencent aujourd'hui petit à petit d'intégrer des interfaces qui permettent la communication avec des logiciels de modélisation mais on est encore loin de l'intégration des modeleurs architecturaux dans ce genre des logiciels acoustiques, peut être parce que tout simplement les logiciels acoustiques et ceux de modélisation sont destinés à des populations différentes avec des compétences différentes et avec d'autres objectifs.

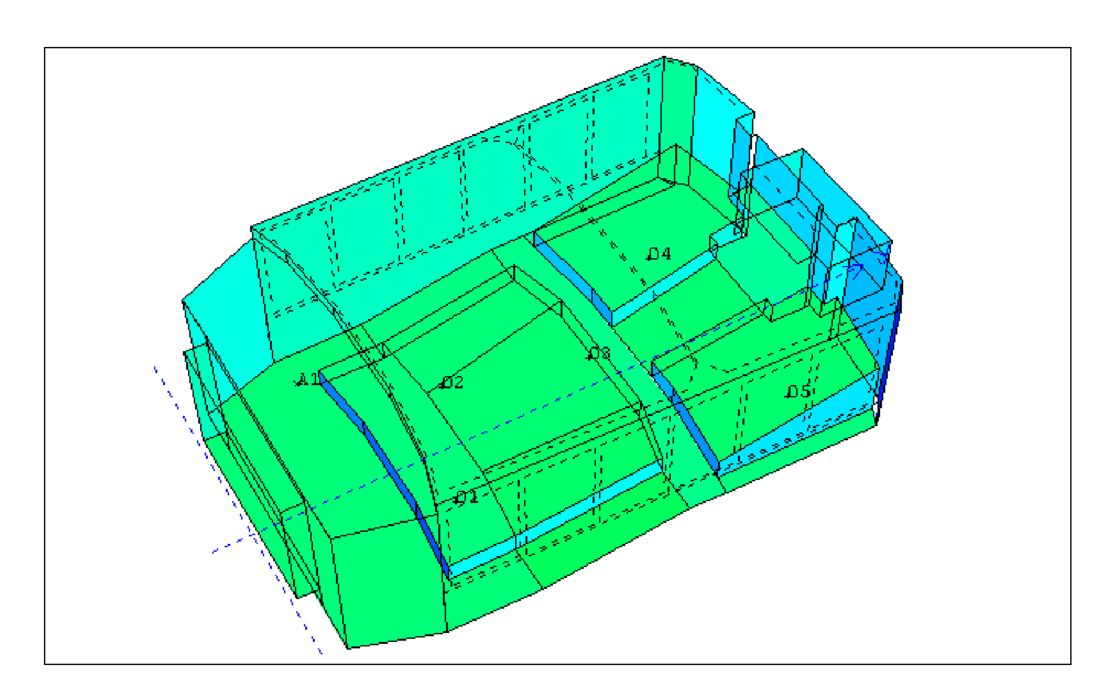
Actuellement, d'un coté, il n'y a peut être pas de logiciel de modélisation C.A.O. qui intègre une application spécifique sur la simulation acoustique et de l'autre coté, il n'existe pas une application de calcul acoustique qui s'adapte à un logiciel de modélisation C.A.O. Ce rapprochement permettrait d'impliquer le calcul acoustique dans l'évolution de la modélisation qui impacterait la conception architecturale et acoustique. Mais ce rapprochement ne serait pas encore complet s'il n'était pas accompagné par des interfaces d'aide sur la conception acoustique, des interfaces de vérification et d'évaluation des résultats acoustiques (cf. chap. 5) et des méthodes informatiques d'interaction (ex : processus de modélisation en vue de simulation acoustique, etc..., cf. chap. 5) entre le monde C.A.O. et celui de la simulation acoustique. Cette problématique est abordée par les études développées ici, qui aboutissent à une plate-forme d'aide en simulation acoustique adaptable à un logiciel de modélisation C.A.O. (cf. chap. 6).

3.4 Logiciels de simulation acoustique et logiciels de conception architecturale

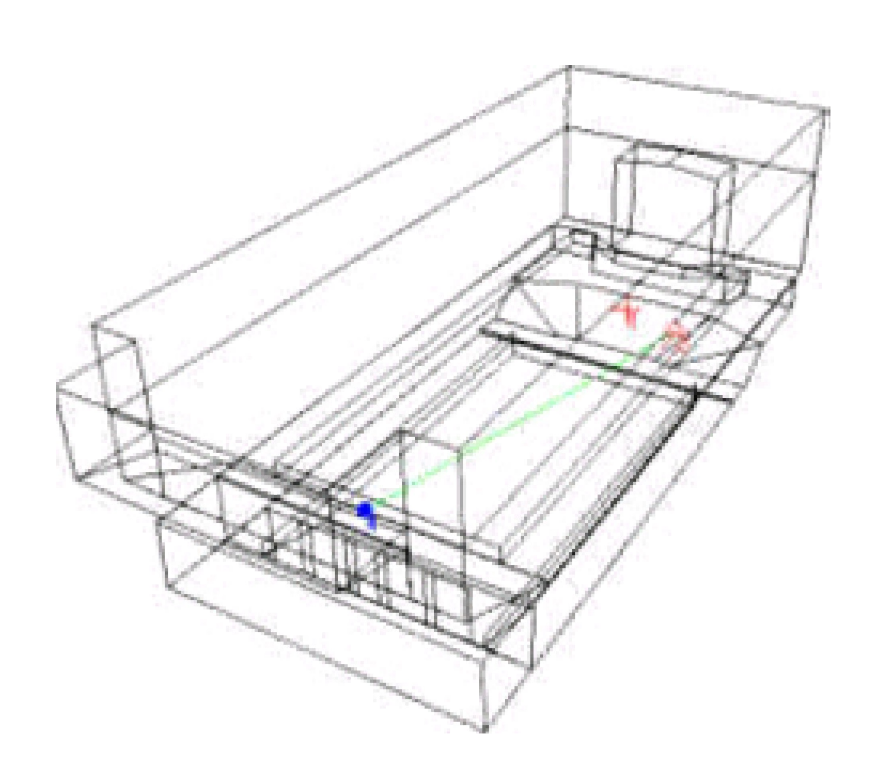
Le rapprochement des outils de simulation acoustique et de conception architecturale, comme déjà expliqué auparavant dans le même chapitre, faciliterait la conception acoustique et architecturale. Pourtant ce rapprochement ne pourrait s'effectuer que sur une petite partie des fonctions de ces logiciels (ex : modélisation architecturale, évaluation des résultats, etc..., cf. chap. 3.3). Cela s'explique facilement des différentes approches et finalités que ces outils

Tableau 3.3

Visualisation des modèles dans des logiciels de simulation acoustique



a. Modèle numérique sur CATT-ACOUSTIC [Catt-Acoustic, 2002]



b. Modèle numérique sur ODEON [Odeon, 2002b]

visent. *Un logiciel de simulation acoustique n'est pas et ne devrait pas être un logiciel de conception architecturale.*

Un outil de prévision acoustique vise à la qualité acoustique d'un lieu d'écoute. La préoccupation finale d'une telle étude consiste à satisfaire un certain nombre d'impressions auditives et des sensations sonores indispensables au confort d'écoute qui sont mesurées par des critères physiques et techniques (critères objectifs) [Semidor, 1999]. Un tel logiciel prend en compte tous les éléments acoustiques qui influencent la qualité acoustique (matériaux, surfaces, coefficients d'absorption, comportement physique et géométrique du son, etc...) afin de pouvoir calculer les critères objectifs [Semidor, 1997]. Les méthodes d'aménagement acoustique proposées par l'acousticien ou bien les résultats acoustiques calculés par le logiciel qui valident le « bien fondé » de la conception acoustique se heurtent souvent avec le résultat architectural souhaité, fonctionnel et esthétique. La finalité « technique » du logiciel de prévision acoustique ne tient pas compte légitimement ni les aspects architecturaux (perception, usage, esthétisme, etc...) ni du processus de la conception architecturale. Cet outil est fondé par conséquent sur des éléments techniques nécessaires afin de pouvoir se concentrer sur le calcul des critères objectifs en se rapprochant au mieux aux valeurs acoustiques idéales. Son approche technique et sa démarche purement acoustique, nécessite des connaissances particulières pour son utilisation et sa finalité ; de ce fait l'élaboration d'un espace diffère diamétralement de celui d'un logiciel de conception architecturale.

Un outil de conception architecturale tel qu'un logiciel de C.A.O. a comme objectif d'aider et d'accompagner le concepteur dans son processus complexe de conception et/ou de production architecturale. Le processus de la production architecturale suivant P.Quintrand et ses collègues [Quintrand et al., 1985] se distingue en trois grandes étapes :

- le programme,
- la composition (depuis la réflexion de l'esquisse jusqu'à l'élaboration des documents nécessaires à la production) et
- la réalisation (qui débute à la construction).

Selon L.Adolphe [Adolphe, 1991], la deuxième étape et plus particulièrement la première phase de faisabilité est la plus importante (Tableau 3.4). Cette phase s'inscrit dans un processus de conception architecturale du long travail de la démarche intellectuelle sur le programme et l'élaboration progressive de l' « idée ». Le logiciel de conception architecturale souvent intervient dans cette phase en transformant les esquisses en présentations tridimensionnelles pour une meilleure perception ou bien en concevant et en élaborant l'objet de la conception de manière continue directement sur le logiciel. Pendant cette phase l'architecte prend des décisions stratégiques difficiles à modifier sans remettre en question son parti. De ce fait l'élaboration architecturale de la salle dans une démarche d'une conception acoustique demeure extrêmement compliquée et difficile. Très souvent des éléments architecturaux, jouant un rôle très important dans la conception architecturale, ne sont pas forcement tenus en compte dans l'aménagement acoustique et bien souvent ne favorisent pas la qualité acoustique. Le logiciel de conception architecturale c'est l'outil indispensable entre autre de la modélisation et de la présentation complète de l'objet de conception avec tous ses détails architecturaux. Cette « réalisation de la conception architecturale » a des difficultés majeures de s'adapter et de se limiter aux exigences dues à une qualité acoustique, surtout dans cette phase.

Tableau 3.4

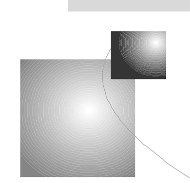
Phase	Mission	Contenu	Tâches	Échelle	Acteur	Intervenants
Intention	programme	Décision d'aménager Choix fonctionnel Faisabilité Budget	Collecte de l'information Levée de plans Analyse du site	Diagramme fonctionnel	Maître d'ouvrage Usagers Géomètres	Architecte
Composition ou Conception primaire	Esquisse Avant Projet Sommaire	Diagnostic architectural Organisation des espaces Formes-Percements Formalisation et résolution graphique du problème Estimations préliminaires	Implantation-Orientation Géométrie de l'enveloppe Choix matériaux gros-oeuvre	1/500 – 1/200 1/200 – 1/100	Architecte Architecte	Bureaux d'études Ingénieurs conseils si projet complexe Bureaux d'études Ingénieurs conseils si projet complexe
Instrumentation	Avant Projet Détaillé (APD) Spécifications Techniques Détaillées Plan d'Exécution des Ouvrages	Établissement d'un modèle de construction Plans Métrés Devis	Choix des équipements Composition Enveloppe Second œuvre Dimensionnement initial Permis de construire	1/100 – 1/50 1/50 – 1/10	Bureaux d'études Architecte Bureaux d'études Architecte	Entreprise exceptionnellement Entreprise exceptionnellement
Réalisation	Dossier de Consultation des Entreprises Dossier des Ouvrages Exécutés	Choix des entrepreneurs	Ordonnancement des tâches Contrôle sécurité Structure Réception		Entreprise Installateurs Usager Gestionnaire	Bureaux de contrôle Exploitant

Description des étapes de conception dans les règles de l'ingénierie [Adolphe, 1991]

La structure et la finalité de chacun de ces logiciels diffèrent considérablement. Leur utilisation et les connaissances techniques requises de fonctionnement ne sont pas les mêmes. Le public à qui ils s'adressent est différent et en même temps destiné à collaborer. Pourtant un rapprochement de certaines fonctions et d'une certaine philosophie entre les deux outils reste indispensable car les deux conceptions, architecturale et acoustique, s'influencent, se croisent dans leur processus et à un moment elles doivent exister parallèlement afin de réaliser un espace architectural acoustiquement correct.

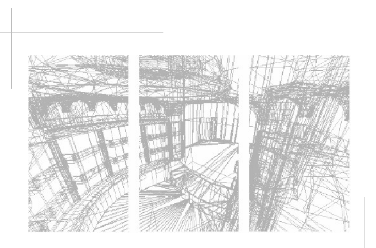
Chapitre 4

Processus informatique d'aide à la modélisation géométrique d'un espace en vue de la simulation acoustique



4. Processus informatique d'aide à la modélisation géométrique d'un espace en vue de la simulation acoustique

4.1 Processus informatique et conception architecturale
4.2 Définition des phases du processus informatique de modélisation
4.2.1 Phase 1 : Collecte d'éléments architecturaux
4.2.2 Phase 2 : Modélisation complète
4.2.3 Phase 3 : Transformation du volume 3D en facettes triangulaires
4.2.4 Phase 4 : Elaboration – affinement - simplification de la géométrie surfacique
4.2.5 Phase 5 : Gestion des calques
4.2.6 Phase 6 : Gestion des blocs
4.3 L'influence du modèle architectural simplifié aux résultats acoustiques
4.3.1 Introduction
4.3.2 Méthode de travail
4.3.3 « Calage du modèle »
4.3.4 Elaboration des modèles
4.3.5 Résultats du calcul
4.3.6 Conclusions
4.4 Analyse des conséquences de la simplification d'un modèle architectural sur les résultats acoustiques
4.4.1 Introduction
4.4.2 Comparaison des surfaces après simplification
4.4.3 Principes de méthode de simplification
4.4.4 Conclusions
4.4.5 Réflexions entre modélisation et simplification



4.1 Processus informatique et conception architecturale

La conception architecturale est un processus très complexe pendant lequel l'acteur principal, l'architecte, doit faire face à des contraintes et à des exigences particulières à chaque fois afin de pouvoir communiquer son idée et proposer des « nouveaux comportements » qui répondent à des besoins humains et à un autre niveau de vie à la fois. Ces contraintes sont aussi imposées par des normes ou des règles différentes qui empêchent et qui déterminent à la fois l'action de l'architecte.

L'architecte par rapport à sa sensibilité personnelle, son intuitivité, sa façon de concevoir, son talent et un nombre des critères individuels, filtre les contraintes à sa façon à travers un processus de conception architecturale qui le rend « libre » de fonctionner et d'intervenir. Il essaie d'inventer à travers toutes ces exigences et limites imposées, ses « propres limites de liberté d'action » et de les étendre ou les bien définir afin qu'il puisse pendant son processus conceptuel architectural, « *rejeter* » », « *trier* », et « *proposer* ». Or, chaque processus adapté par l'architecte pendant sa phase de conception architecturale, doit pouvoir étendre ou déterminer justement « ces propres limites de liberté d'action ». Dans cet esprit il faut amener un processus informatique afin que le concepteur de l'espace puisse en profiter au maximum.

La définition du processus informatique d'aide à la modélisation géométrique d'un espace en vue de la simulation acoustique, comme partie d'un outil d'aide à la conception architecturale d'un espace acoustique, exige une adaptation essentielle préalable de ses phases aux différentes phases d'un modèle de conception architecturale en fonction de l'acoustique d'une salle. La méthodologie de définition d'un outil d'informatique de prévision acoustique adaptable à la conception architecturale à travers un logiciel de modélisation architecturale C.A.O. doit intégrer le processus informatique mentionné et analysé ci-après, de manière à ce que ce dernier influence la réflexion architecturale pendant la modélisation géométrique de l'espace en vue de simulation tridimensionnelle acoustique et à long terme le processus lui-même de conception architecturale d'un espace acoustique.

Ce processus informatique nécessite un raisonnement purement architectural et une approche critique adaptée à la problématique du processus de conception architecturale (fig.3). L'élaboration des éléments de la géométrie lors de ce processus informatique, est une démarche de proposition des modifications architecturales susceptibles de corriger la qualité acoustique.

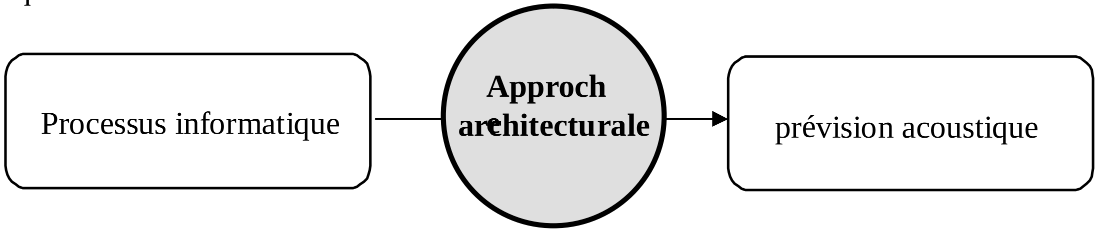
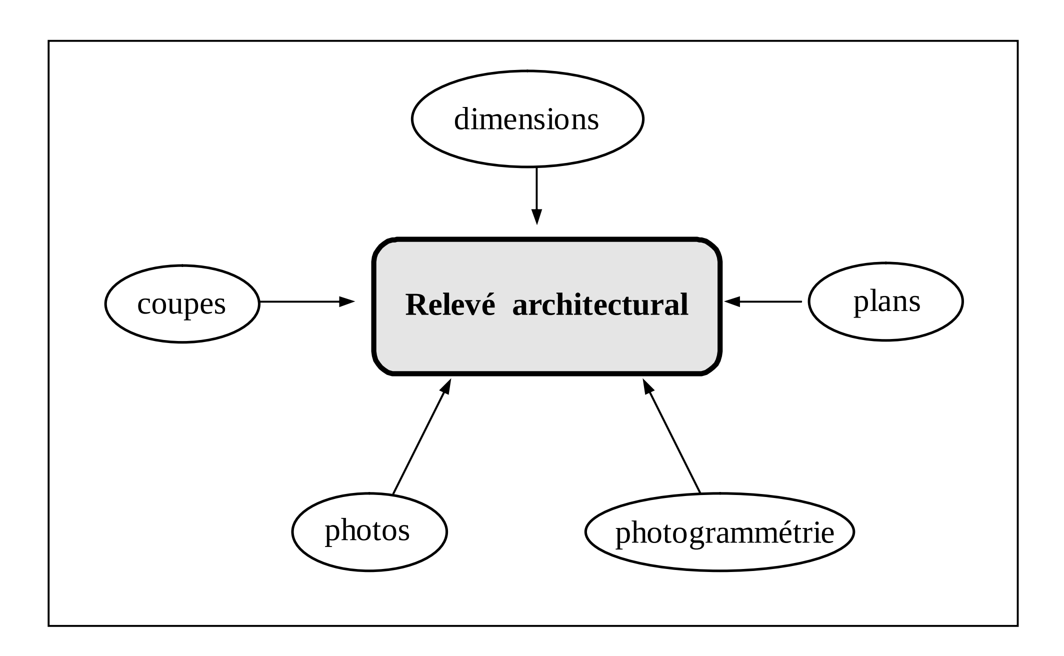


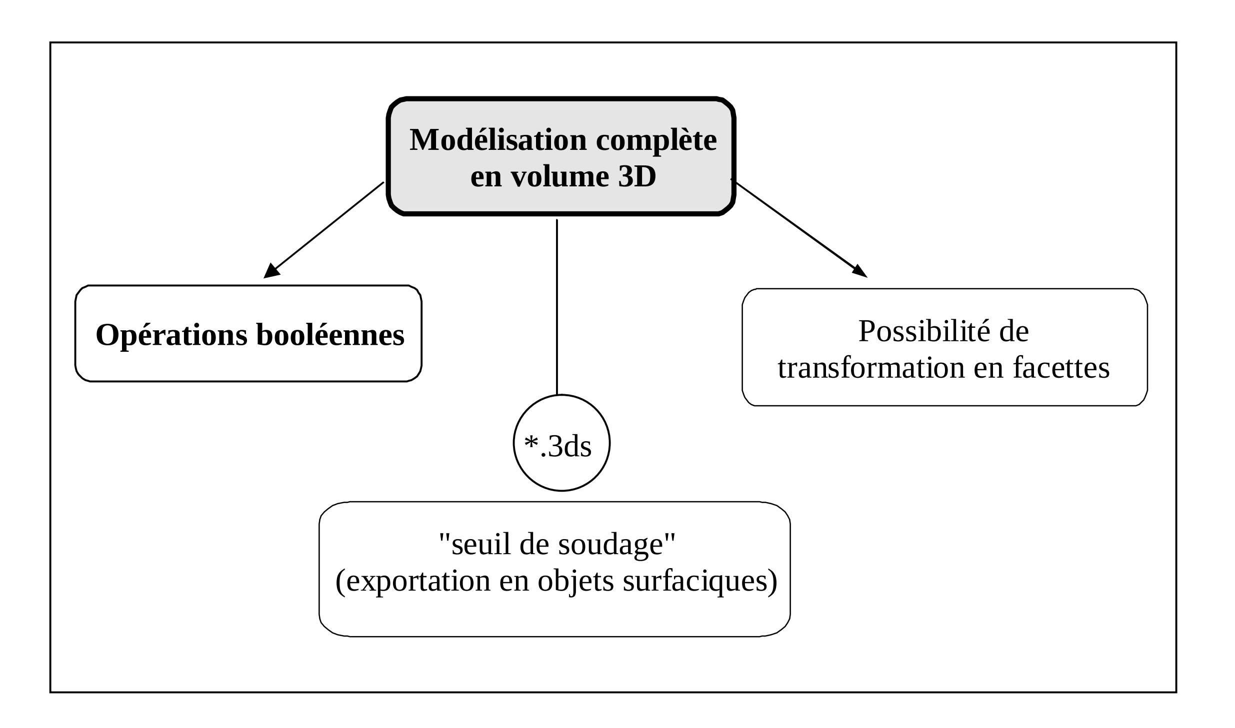
Fig. 3 - Représentation schématique du processus informatique d'une approche architecturale

Tableau 4.1

Processus informatique d'aide à la modélisation géométrique d'un espace en vue de la simulation acoustique



a. **Phase 1 -** Représentation schématique [Kouzeleas, 1997]



b. **Phase 2 -** Représentation schématique [Kouzeleas, 1997]

Cet acte manifeste l'importance de chaque élément architectural par rapport au comportement sonore et vis-à-vis de l'espace architectural global. La méthodologie de simplification et d'affinement des formes, des volumes et des objets en vue de simulation acoustique doit faire face à la restriction de « la liberté d'action » de l'architecte. Celui-ci doit *« protéger » et « adapter » son processus conceptuel aux exigences émanant d'une telle méthodologie.*

Le processus de conception architecturale nécessite à son tour une approche critique adaptée au raisonnement du processus informatique (fig.4).

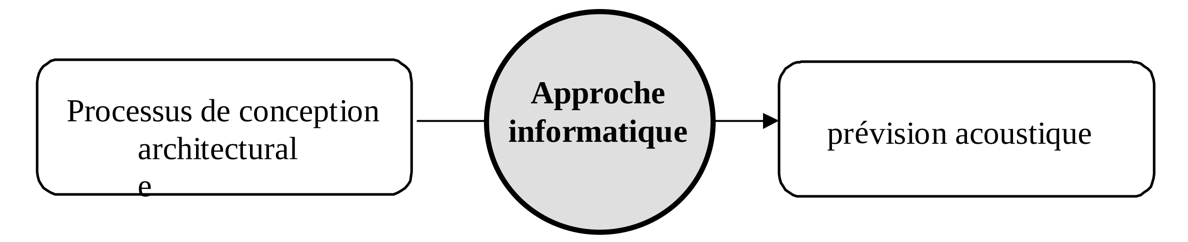


Fig. 4 - Représentation schématique du processus informatique d'une approche architecturale

Cette « approche informatique » du processus de conception architecturale permet de contrôler en avance des contraintes sur le projet en vue de simulation acoustique. Autrement dit, elle permet de vérifier en permanence la qualité acoustique de l'espace à travers d'une simulation acoustique précoce pendant même la phase de la conception architecturale et d'éviter ainsi ultérieurement une falsification éventuelle de la géométrie architecturale, déjà conçue, en fonction du comportement sonore.

4.2 Définition des phases du processus informatique de modélisation

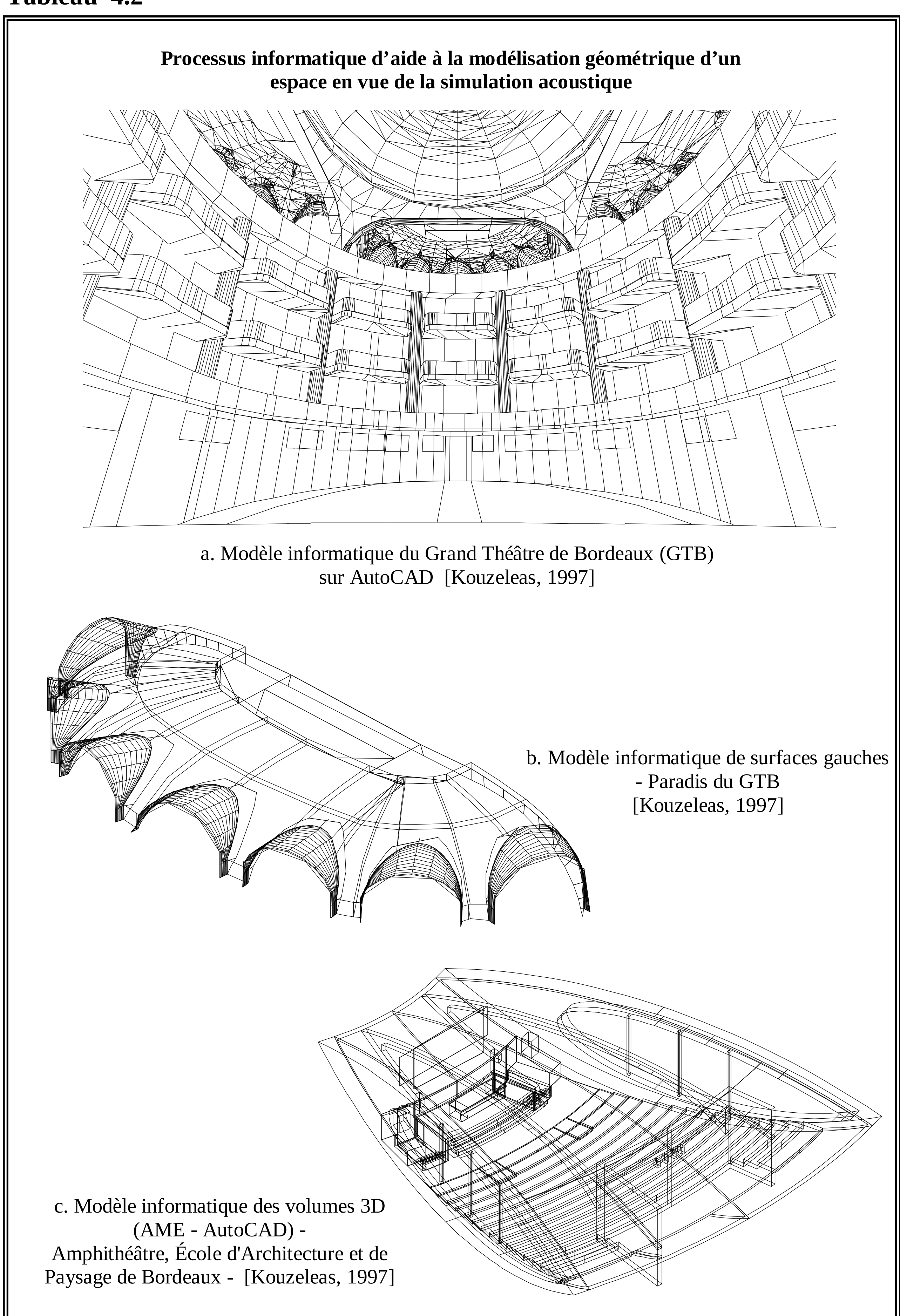
Le processus informatique ici décrit, est qualifié en tant que tel au sens absolu du terme. Il s'agit d'une procédure avec des étapes à l'aide de l'informatique pour adapter la modélisation architecturale aux exigences et aux limites d'un logiciel de simulation acoustique. Il peut servir au processus de la conception architecturale mais dans aucun cas peut être un processus de conception architecturale. Le développement de ce processus est basé sur le logiciel acoustique Epidaure, mais sa démarche est valable pour d'autres outils de simulation acoustique.

4.2.1 Phase 1 : *Collecte d'éléments architecturaux*

Cette phase de « collection des informations architecturales », constitue une phase « *meta-conception* », puisqu'on doit avoir à sa disposition des éléments architecturaux déjà conçus, bien définis et précis, au niveau de dimensionnement, position, forme, etc…, afin de pouvoir ensuite modéliser l'espace qui correspond le mieux à la réalité. Dans cette phase, des éléments purement architecturaux tels que des plans et des coupes bien détaillées, des dimensions précises, des photos, ainsi que des méthodes de relevé architectural telle que la

Tableau 4.2

Processus informatique d'aide à la modélisation géométrique d'un espace en vue de la simulation acoustique



a. Modèle informatique du Grand Théâtre de Bordeaux (GTB) sur AutoCAD [Kouzeleas, 1997]

b. Modèle informatique de surfaces gauches - Paradis du GTB [Kouzeleas, 1997]

c. Modèle informatique des volumes 3D (AME - AutoCAD) - Amphithéâtre, École d'Architecture et de Paysage de Bordeaux - [Kouzeleas, 1997]

photogrammétrie, deviennent selon les cas indispensables, afin de pouvoir bien reconstituer la géométrie de l'espace souhaité (Tableau 4.1a)

Pendant cette phase, on ne prend pas en compte les limites qui s'imposent sur le logiciel de simulation acoustique et qui concernent le nombre des facettes, les formes des éléments etc... C'est pour cela que chaque élément et chaque détail de la géométrie, doit être saisi pendant le relevé architectural, afin d'avoir la possibilité en suite, du choix de l'élimination de facettes d'après le principe de fonctionnement du logiciel de calcul, dans une phase ultérieure, en cas de dépassement des contraintes imposées par le logiciel [Kouzeleas, 1997].

4.2.2 Phase 2 : *Modélisation complète*

Lors de cette 2ème phase, se réalise une modélisation complète de la géométrie intérieure de l'espace concerné, à l'aide d'un logiciel de modélisation tridimensionnelle, comme AutoCAD. Les éléments architecturaux de la première phase dont on a besoin afin de constituer la géométrie de cet espace, comportent en général beaucoup de détails, car ils proviennent d'un cabinet d'architecte ou d'un autre concepteur d'une installation thermique ou électrique (cf. chap. 7.1.4, phase 2).

Pendant cette phase (Tableau 4.1b) une modélisation la plus complète, détaillée et exigeante, est recommandée (Tableau 4.2a), car il y a toujours la possibilité de simplification des formes ultérieurement. Même les formes les plus complexes (surfaces gauches) qui sont faites avec la modélisation surfacique d'AutoCAD (AME) (Tableau 4.2b), pourront être transformées en facettes triangulaires, dans une autre phase, ce qui explique la recommandation d'une modélisation complète de la géométrie de l'espace, sans tenir compte les contraintes du logiciel de simulation et de calcul d'acoustique [Kouzeleas, 1997].

Une telle modélisation et sauvegarde du volume 3D comme « base de données » en format *.dwg dans AutoCAD (cf. chap. 7.1.4, phase 2), nous donne toujours la possibilité d'effectuer une modification volumique ultérieure en utilisant des opérations booléennes et donc mieux gérer la géométrie de l'espace concerné [AutoCAD, 2000]. En même temps la possibilité d'une nouvelle transformation de la géométrie volumique en facettes est toujours présente, ce qui garantit notre processus (Tableau 4.2c)

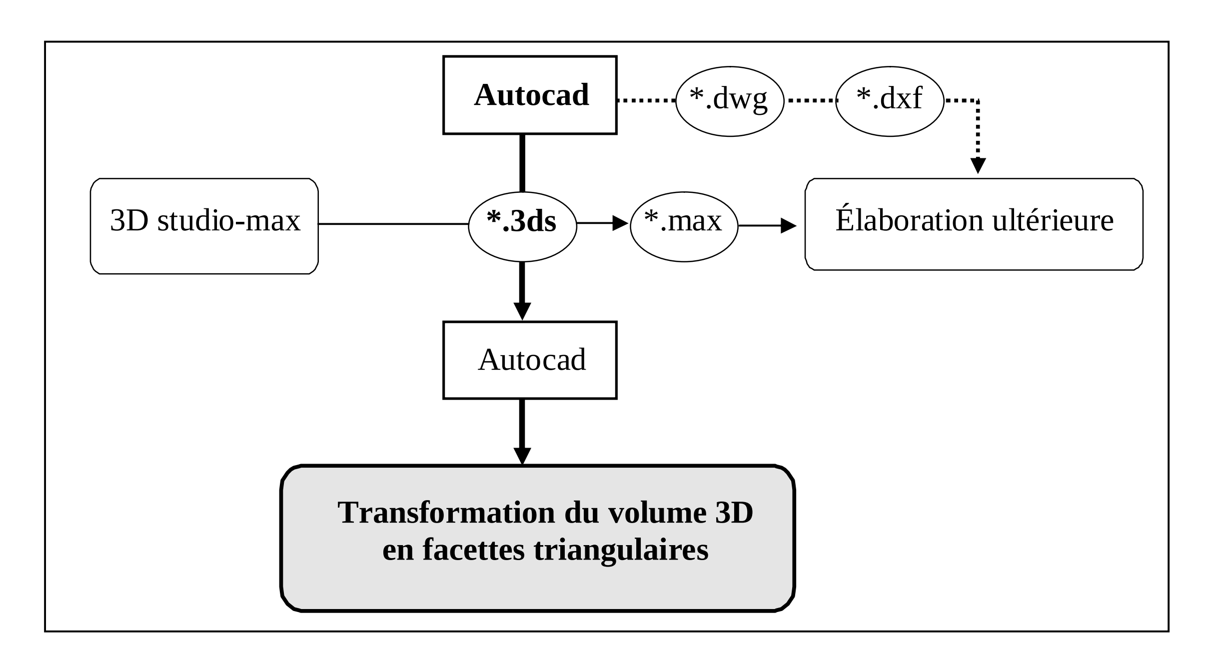
4.2.3 Phase 3 : *Transformation du volume 3D en facettes triangulaires*

Cette étape permet de transformer les objets volumiques d'AutoCAD (AME) en facettes coplanaires afin d'être utilisables par un logiciel de simulation acoustique. Pour faire cela, on va se servir de l'interface d 'AutoCAD au niveau d'exportation des fichiers. On sera obligé alors, de passer par l'intermédiaire d'un format «d'exportation surfacique», qui transforme la géométrie volumique en une seule polyligne qui doit être ensuite décomposée

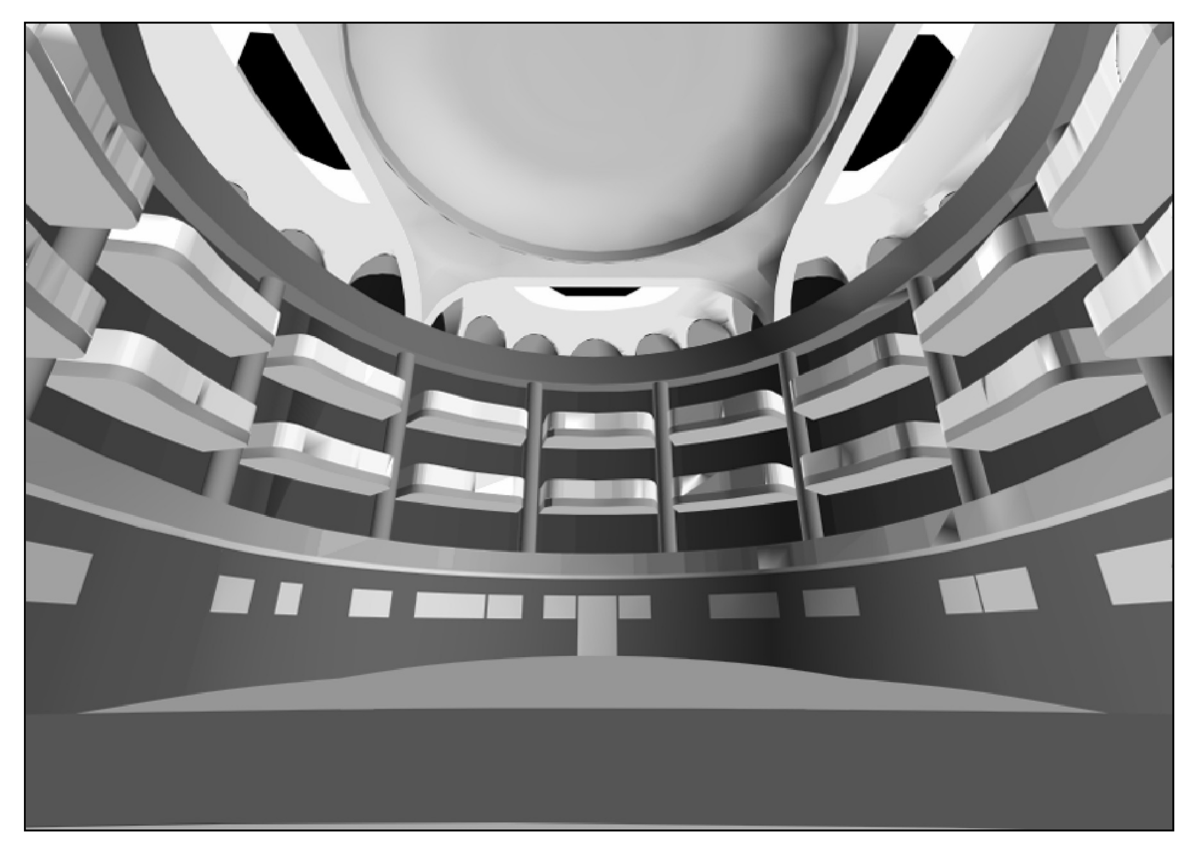
Tableau 4.3

Processus informatique d'aide à la modélisation géométrique d'un espace en vue de la simulation acoustique

Phase 3 - *Transformation du volume 3D en facettes triangulaires*



a. Phase 3 - Représentation schématique [Kouzeleas, 1997]



b. Rendu exporté du logiciel d'image de synthèse 3D studio-max - Perspective du GTB [Kouzeleas, 1997]

afin de la transformer en facettes (Tableau 4.3a).

Dans une première étape, la géométrie volumique provenant d'AutoCAD doit être exportée en fichier de format *.3ds*, (format propre du logiciel 3D studio-max, logiciel de modélisation - image de synthèse et d'animation) (Tableau 4.3b) (cf. chap.7.1.4, phase 3, n°1).

Dans l'étape suivante il s'agit d'importer de nouveau le même fichier exporté en format *.3ds*, sur AutoCAD. Ensuite, on récupère toute la géométrie en une seule « polyligne particulière » qui définit tous les cotés des futures surfaces. Après la décomposition de cette polyligne à l'aide de l'outil de décomposition d'AutoCAD (commande: « Décomposer ») [AutoCAD, 2000], la géométrie se transforme en facettes triangulaires (fig. 5). La sauvegarde de l'espace en format propre d'AutoCAD (*.dwg) est nécessaire afin de s'en servir dans la phase prochaine (cf. chap. 7.1.4, phase 3, n°2) [Kouzeleas, 1997].

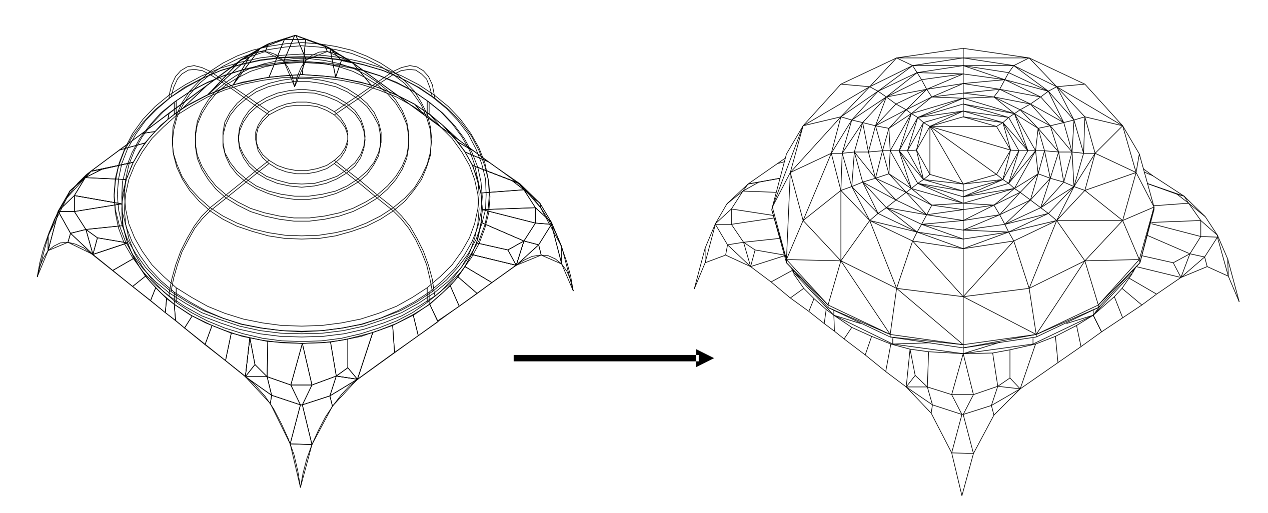


Fig. 5 - Transformation des solides en facettes triangulaires. A gauche, entité solide (AME - AUTOCAD) avant transformation. A droite, la même entité en facettes triangulaires après avoir subi une exportation en fichier format *.3ds*.-Modèles informatiques de la coupole du GTB – [Kouzeleas, 1997]

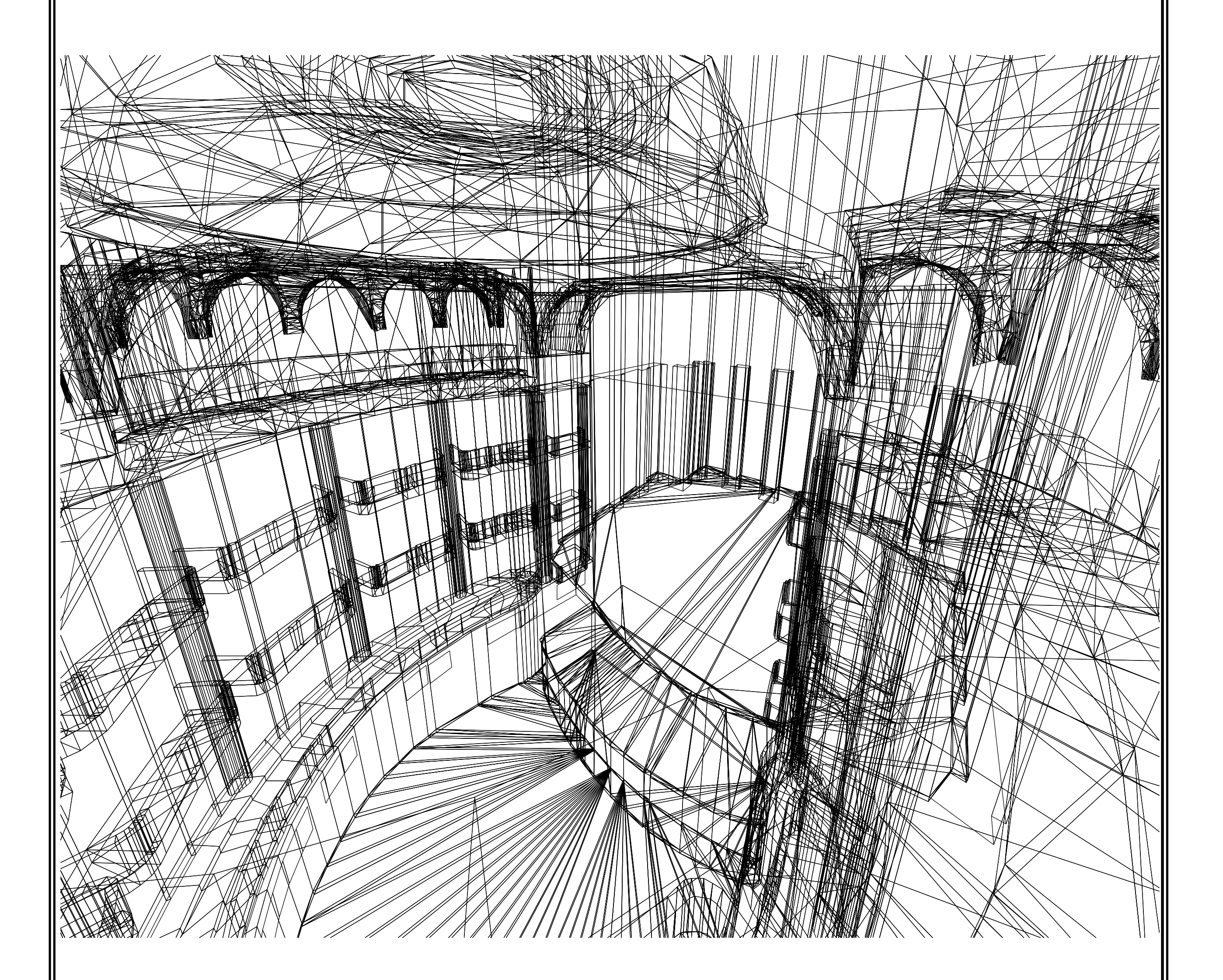
Pendant cette phase, une sauvegarde de la géométrie en format *.max* sur 3D studio-max nous permet une manipulation à long terme afin d'un coté de ré-utiliser la géométrie surfacique définie pour simulation (rendu en image de synthèse-animation) et de l'autre coté d'avoir la possibilité de profiter de l'amélioration des logiciels de calcul acoustique qui deviendraient plus performants et qui ne seraient pas limités quant aux nombres de facettes délimitant la géométrie de l'espace.

Enfin, la procédure précédente permet d'obtenir ainsi une géométrie déjà transformée en surfaces triangulaires (Tableau 4.4), d'une part en réglant le nombre des facettes et d'autre part en évitant l'utilisation d'un autre logiciel « surfacique » tel que 3D studio-max, comme intermédiaire.

Tableau 4.4

Processus informatique d'aide à la modélisation géométrique d'un espace en vue de la simulation acoustique

Phase 3 - *Transformation du volume 3D en facettes triangulaires*



Modèle informatique en lignes filaires. Volume déjà transformé en facettes triangulaires. On observe la complexité et le grand nombre des facettes (26.607 facettes). On peut aussi remarquer la transformation du sol de l'auditoire et du proscenium en facettes triangulaires. Perspective depuis le paradis du GTB - [Kouzeleas, 1997]

4.2.4 **Phase 4 :** *Elaboration – affinement - simplification de la géométrie surfacique*

Cette phase est la phase de l'élaboration « manuelle » du volume surfacique (Tableau 4.5). Une fois que la géométrie automatiquement simplifiée (cf. chap. 4.2.3-phase 3) est enregistrée en format **.dwg*, nous pouvons commencer à élaborer cette géométrie afin d'éliminer un grand nombre des facettes parasites qui ne servent pas au calcul acoustique.

Cette élaboration manuelle consiste à enlever la « *peau extérieure* » du volume modélisé qui ne joue aucun rôle dans la simulation acoustique intérieure (fig. 6). Ceci dit, il faut enlever chaque facette qui fait partie de la couche extérieure du volume et qui a été construite obligatoirement lors de la phase de la modélisation du volume (« extrusion »). Ce long processus doit se faire avec soin, en utilisant les outils de sélection d'AutoCAD et en vérifiant à chaque phase du processus (rendu - lignes cachées) le « bien fondé » de l'opération. De cette façon on n'obtient que le volume intérieur de la géométrie modélisée en facettes, en sauvegardant encore une fois en format **.dwg*, cette fois-ci une géométrie surfacique intérieure encore plus « *allégée* » du nombre des facettes [Kouzeleas, 1997].

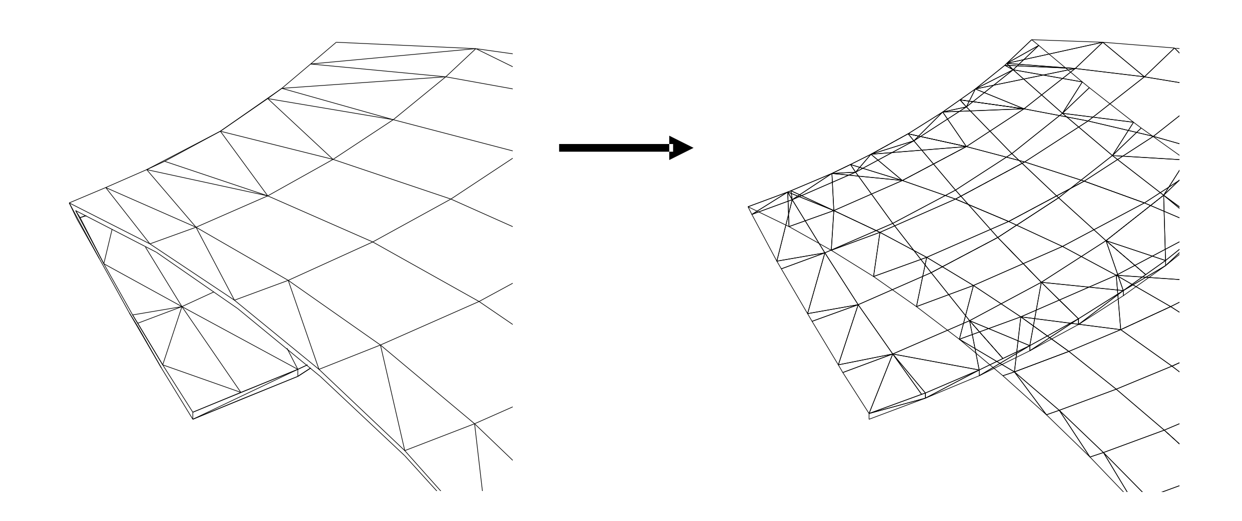
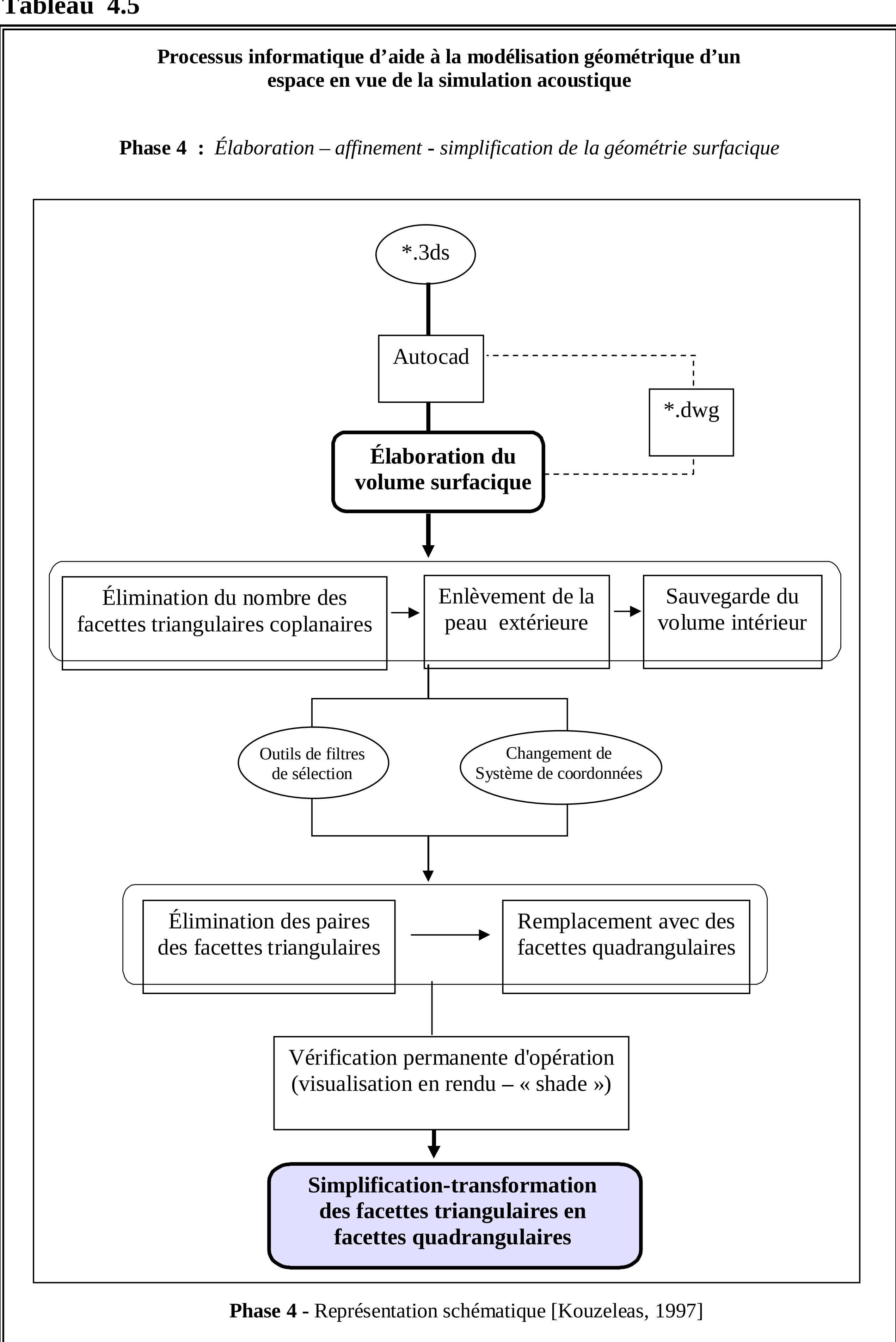


Fig. 6 - Enlèvement de la « peau extérieure » d'un volume déjà transformé en facettes. A gauche, « couche » de plafond d'une certaine épaisseur en lignes cachées. A droite, couche intérieure de plafond, la peau extérieure étant enlevée. Modèle informatique du plafond de l'Amphithéâtre de l'Ecole d'Architecture et de Paysage de Bordeaux [Kouzeleas, 1997]

Dans une deuxième étape « d'affinement », on effectue une simplification et transformation des facettes triangulaires en facettes quadrangulaires (fig. 7). Dans un premier temps il s'agit d'enlever les paires de facettes triangulaires voisines et de les remplacer par des facettes quadrangulaires (commande : « 3d face ») (cf. chap. 7.1.4, phase 4). Pendant cette étape il est indispensable d'être en mesure d'effectuer à chaque instant une vérification de chaque opération. Cette vérification se fait seulement à l'aide d'outils de visualisation de rendu d'AutoCAD (« Shade » - « Cache »), afin de bien simuler la « nouvelle géométrie » des facettes [AutoCAD, 2000].

Tableau 4.5



Phase 4 - Représentation schématique [Kouzeleas, 1997]

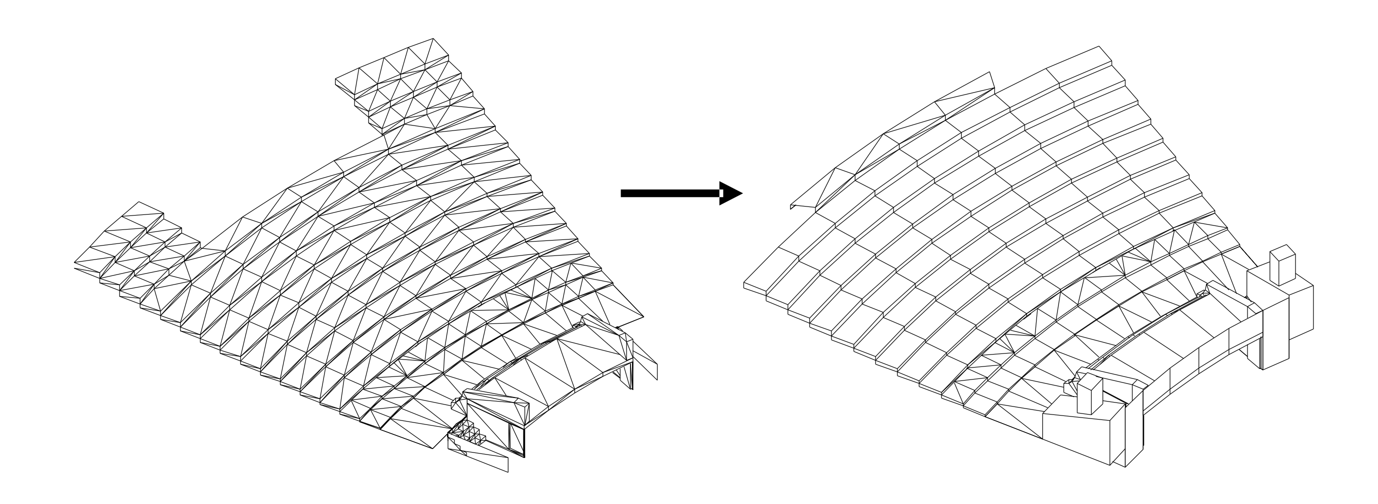


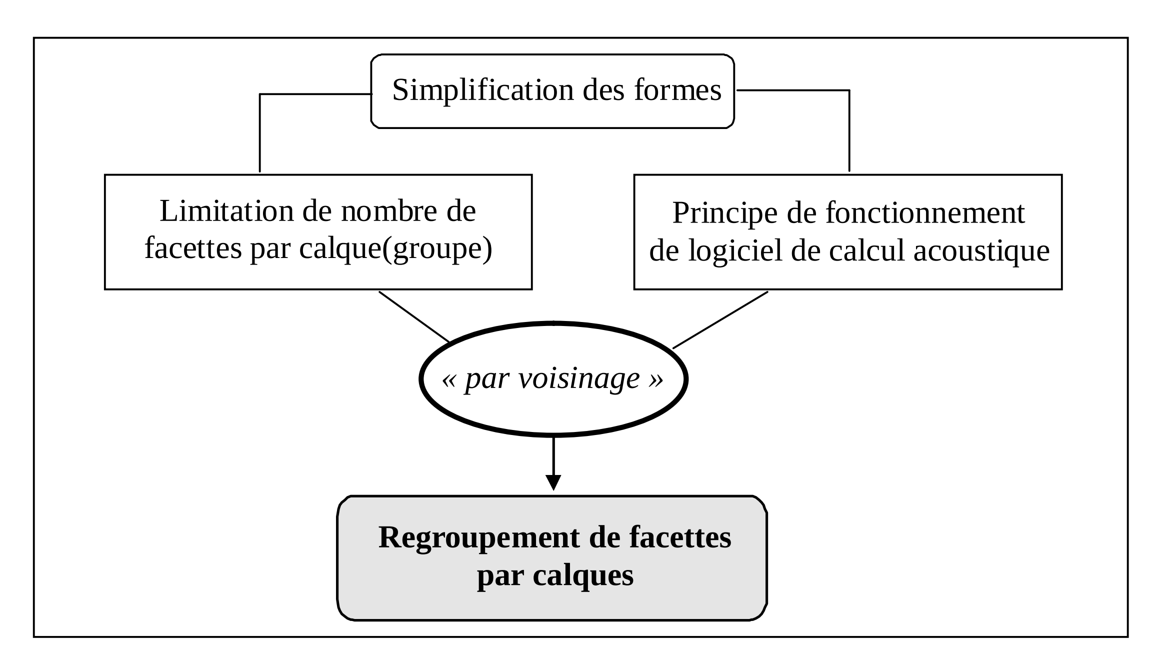
Fig. 7 - Transformation des facettes triangulaires en facettes quadrangulaires. Modèle informatique (AutoCAD) - Auditoire de l'Amphithéâtre de l'école d'Architecture et de Paysage de Bordeaux [Kouzeleas, 1997]

Enfin, pendant cette phase d'affinement, une vérification continue du nombre total des facettes de toute la géométrie modélisée est indispensable, afin de bien savoir si on atteint le nombre adéquat de facettes, posé par la limite du logiciel du calcul acoustique. Cependant, il est prudent que ce nombre de facettes soit assez inférieur au nombre limite du logiciel (100-200 facettes), car il y aura toujours la possibilité d'ajouter et de modifier si nécessaire, des surfaces sur le logiciel du calcul acoustique lui-même. Arrivé à ce niveau du nombre des facettes on peut toujours arrêter cet affinement pour passer à la phase suivante du regroupement des facettes en calques.

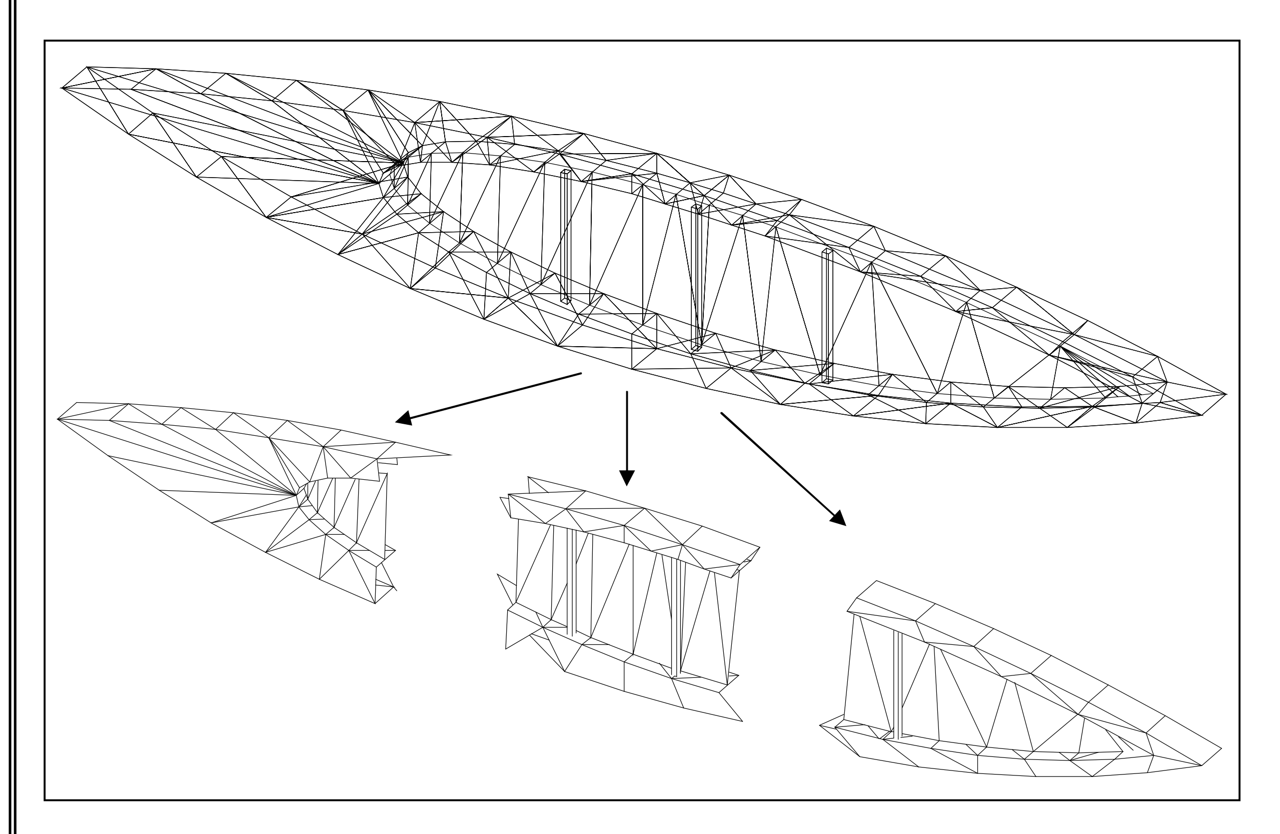
Tableau 4.6

Processus informatique d'aide à la modélisation géométrique d'un espace en vue de la simulation acoustique

Phase 5 : *Gestion des calques*



a. **Phase 5 -** Représentation schématique [Kouzeleas, 1997]



b. Regroupement des facettes en calques en partageant le nombre de facettes en plusieurs calques. En haut, façade en lignes filaires des 292 facettes. En bas, décomposition de cette façade en 3 calques différents en lignes cachées. Modèle informatique (AutoCAD) de la façade (« œil ») de l'Amphithéâtre de l'école d'Architecture et de Paysage de Bordeaux [Kouzeleas, 1997]

4.2.5 Phase 5 : *Gestion des calques*

Cette étape de gestion des calques (Tableau 4.6a), est une phase « délicate » et très importante qui a un impact considérable sur le calcul d'acoustique qui va suivre. Une fois que la simplification de la géométrie est terminée, en obtenant en même temps un nombre total des facettes inférieur à celui de la limite, on regroupe à nouveau ces facettes en calques de sorte que l'on respecte le principe du fonctionnement du logiciel de calcul d'acoustique. Ce principe consiste à éliminer le nombre des facettes de chaque calque au nombre limite du logiciel (ex : 100 facettes maximum sur Epidaure) (Tableau 4.6b). En parallèle la limite se pose aussi au niveau du nombre des calques qui comportent chacun une partie de la géométrie (ex : 25 groupes-calques sur Epidaure) [Epidaure, 1992].

D'après le principe de fonctionnement du logiciel de calcul d'acoustique, *chaque calque doit comporter des « facettes voisines », vis-à-vis de la propagation du son, bien localisées dans une direction d'émission de la source, (Tableau 4.7).*

Par conséquent pour bien respecter ce principe de fonctionnement, on « allège » le nombre de facettes des calques précédents en déplaçant (commande AutoCAD : « changer propriétés ») des facettes vers d'autres calques existants ou des calques que l'on vient de créer afin de « partager » la géométrie à des différents calques (ex :AutoCAD) - groupes (ex :Epidaure) et mieux gérer en suite l'affectation des matériaux sur le logiciel de calcul d'acoustique. Au cas où le nombre des facettes d'un calque qui correspond bien à un endroit « homogène » où les facettes réagissent acoustiquement de la même façon, dépasse légèrement le nombre-limite des facettes, mieux vaut éliminer des facettes et simplifier encore plus la géométrie, pour pouvoir garder dans le même groupe ces facettes voisines, au lieu de les partager en plusieurs calques, afin de respecter au maximum le principe mentionné ci-dessus (fig. 8) [Kouzeleas, 1997].

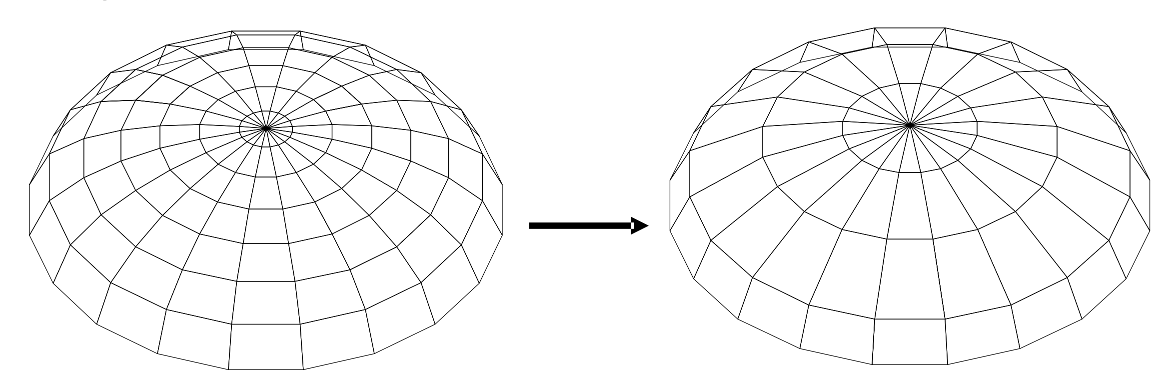
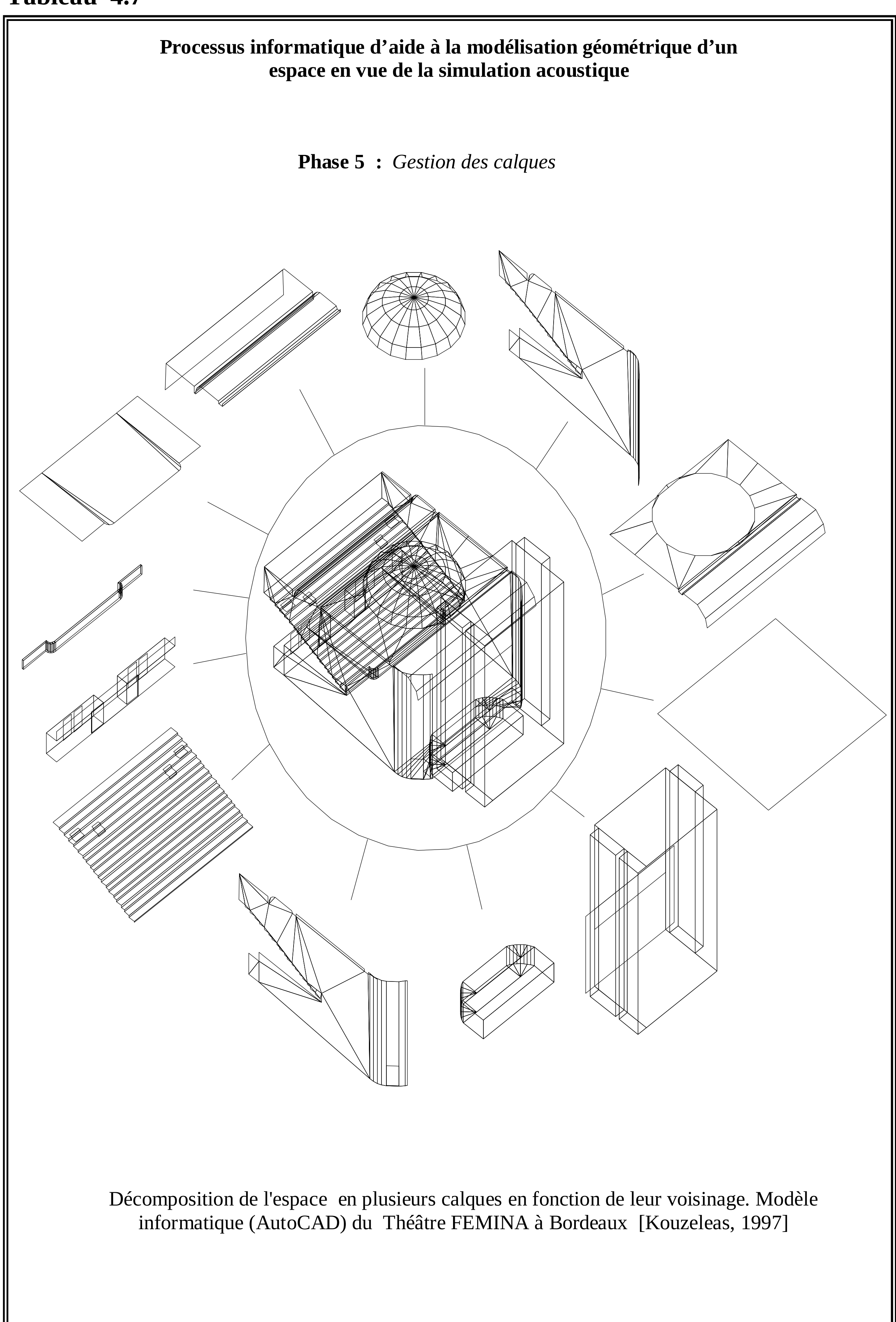


Fig. 8 - Simplification de nombre des facettes de la géométrie dans le même calque. A gauche, coupole avec un nombre de facettes supérieur à 100. A droite la même coupole simplifiée, avec un nombre de facettes inférieur à 100, afin de garder toute la géométrie dans le même calque pour être en suite utilisée comme groupe (limite de groupe : 100 facettes) sur Epidaure [Kouzeleas, 1997]

Ces modifications, doivent être menées de façon prudente afin d'optimiser par la suite l'opération de calcul d'acoustique.

Tableau 4.7



Processus informatique d'aide à la modélisation géométrique d'un espace en vue de la simulation acoustique

Phase 5 : *Gestion des calques*

Décomposition de l'espace en plusieurs calques en fonction de leur voisinage. Modèle informatique (AutoCAD) du Théâtre FEMINA à Bordeaux [Kouzeleas, 1997]

4.2.6 Phase 6 : *Gestion des blocs*

Cette phase constitue la dernière étape du processus avant de passer au logiciel de calcul acoustique. Il s'agit de transformer les calques existants en sorte que leur contenu soit « lisible » par un logiciel de calcul acoustique (Tableau 4.8a).

Dans un premier temps en utilisant l'outil de gestion des calques du logiciel de modélisation (ex : AutoCAD), on exporte le contenu de chaque calque final (Tableau 4.8b) en fichier format **.dwg* en créant des fichiers « blocs » (cf. chap. 7.1.4, phase 6, n°1).

Dans un deuxième temps, il est absolument nécessaire de transformer chacun de ces fichiers-blocs (**.dwg*) en format **.dxf* afin de pouvoir effectuer ensuite l'échange de la géométrie sur le logiciel de calcul acoustique. Ce format **.dxf*, est un format d'échange d'AutoCAD très répandu qui assure l'interface entre la quasi-totalité des logiciels de modélisation avec des logiciels de calcul acoustique. Dans le cas d'une exportation d'un fichier en **.dxf*, il n'y a pas la possibilité de sélectionner des entités parmi d'autres (AutoCAD). C'est pour cela en effet que l'on a besoin de plusieurs calques exportés en blocs pour pouvoir en suite exporter chacun en **.dxf* et assurer ainsi « le partage » de la géométrie de l'espace.

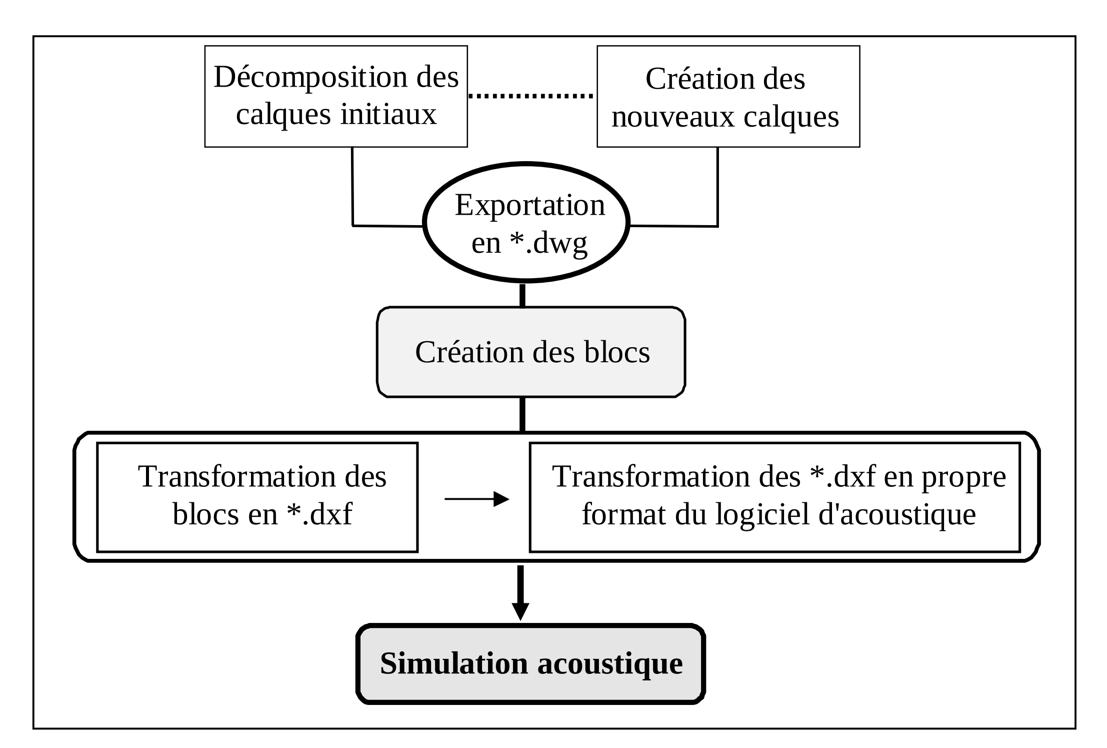
Ensuite, dans une dernière étape, on transforme à nouveau chaque fichier **.dxf* en format cohérent avec le logiciel de calcul acoustique. Certains logiciels lisent directement des fichiers **.dxf* (Raynoise etc..). Il y a d'autres logiciels qui ont besoin de transformer ce type des données en leur propre type-format (Epidaure en **.geo* - Odeon en **.sur* - Catt-acoustic en **.geo*) (cf. chap. 2). L'élaboration de ces fichiers devient une opération indispensable afin de pouvoir regrouper leur contenu dans un « *fichier-mère* », qui comporte toute la géométrie de l'espace concerné (cf. chap. 7.1.4, phase 6, n°2). Ainsi le logiciel d'acoustique distingue chaque groupe-(ancien calque) en visualisant toute la géométrie de l'espace [Kouzeleas, 1997].

La forme architecturale des salles, souvent très complexe, crée des problèmes car les systèmes informatiques de simulation acoustique ont besoin des surfaces planes. Pour approcher au mieux les surfaces courbes, il est nécessaire de travailler avec un grand nombre de facettes. Or beaucoup de logiciels sont limités dans le nombre de facettes qu'ils peuvent accepter. Par ailleurs le nombre élevé des facettes pose des problèmes informatiques de mémoire. Dans tous les cas la simplification du modèle architectural est indispensable car toute modélisation numérique implique une simplification et une réduction de la réalité.

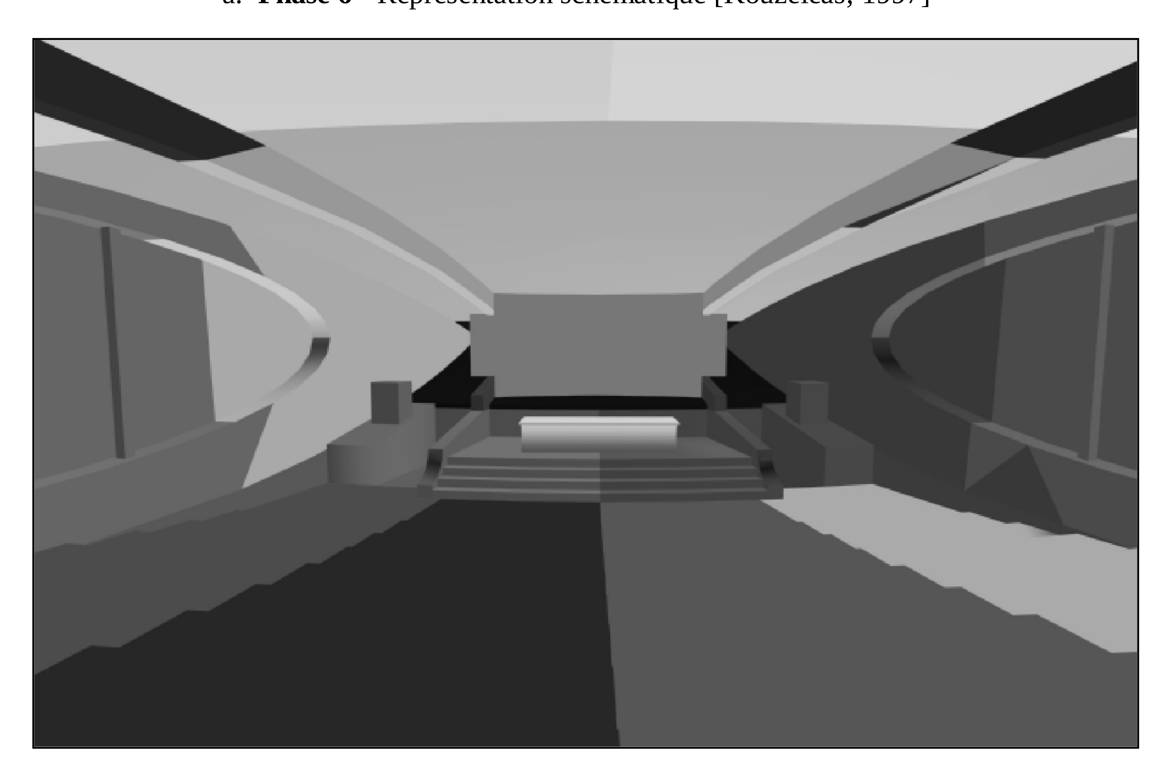
Tableau 4.8

Processus informatique d'aide à la modélisation géométrique d'un espace en vue de la simulation acoustique

Phase 6 : *Gestion des blocs*



a. **Phase 6 -** Représentation schématique [Kouzeleas, 1997]



b. Rendu exporté du logiciel d'image de synthèse 3dStudio-Max. Simulation des différentes zones d'ombres qui représentent chacun un calque différent à exporter. Amphithéâtre de l'école d'Architecture de Bordeaux [Kouzeleas, 1997]

4.3 L'influence du modèle architectural simplifié aux résultats acoustiques

4.3.1 Introduction

Plusieurs salles présentent la plupart du temps des formes courbes tant au niveau de la géométrie intérieure de la salle que des éléments architecturaux qui s'y trouvent (fig. 9). C'est

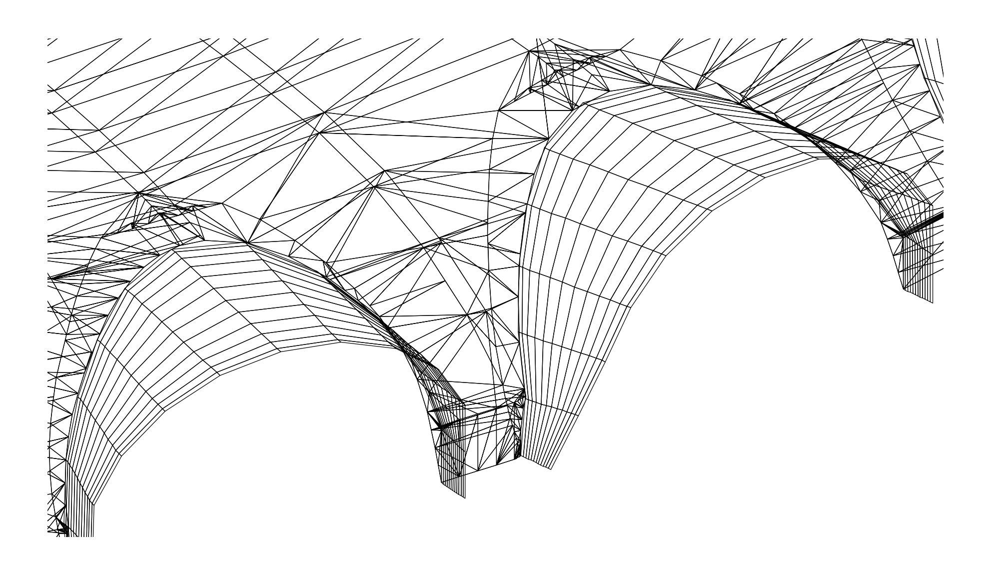


Fig. 9 - Vue partielle des formes courbes du paradis du GTB [Kouzeleas, 1997]

le cas entre autre de la forme « fer à cheval » d'une salle d'opéra avec des colonnes, des balcons décorés et d'autres éléments architecturaux très chargés. Lors de la modélisation en vue de procéder à des calculs de simulation acoustique on est amené à faire des simplifications pour les logiciels qui exigent des surfaces planes et répondre ainsi aux problèmes informatiques de calcul et de mémoire.

Dans cette étude via une comparaison des mesures acoustiques effectuées avec des résultats de calcul de simulation acoustique sur des modèles simplifiés, on illustre l'influence du modèle architectural simplifié aux résultats acoustiques [Kouzeleas, 2001a].

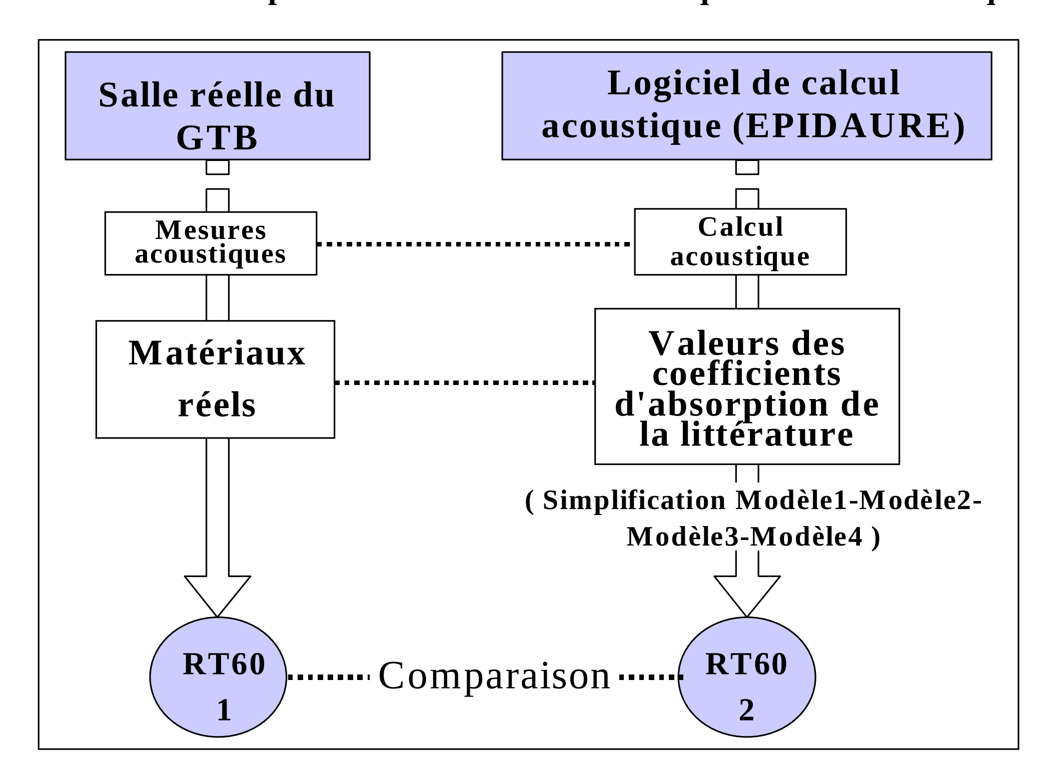
4.3.2 Méthode de travail

La méthode de travail de base consiste à comparer les résultats des mesures avec les résultats de calcul sur plusieurs modèles architecturaux de différents degrés de simplification.

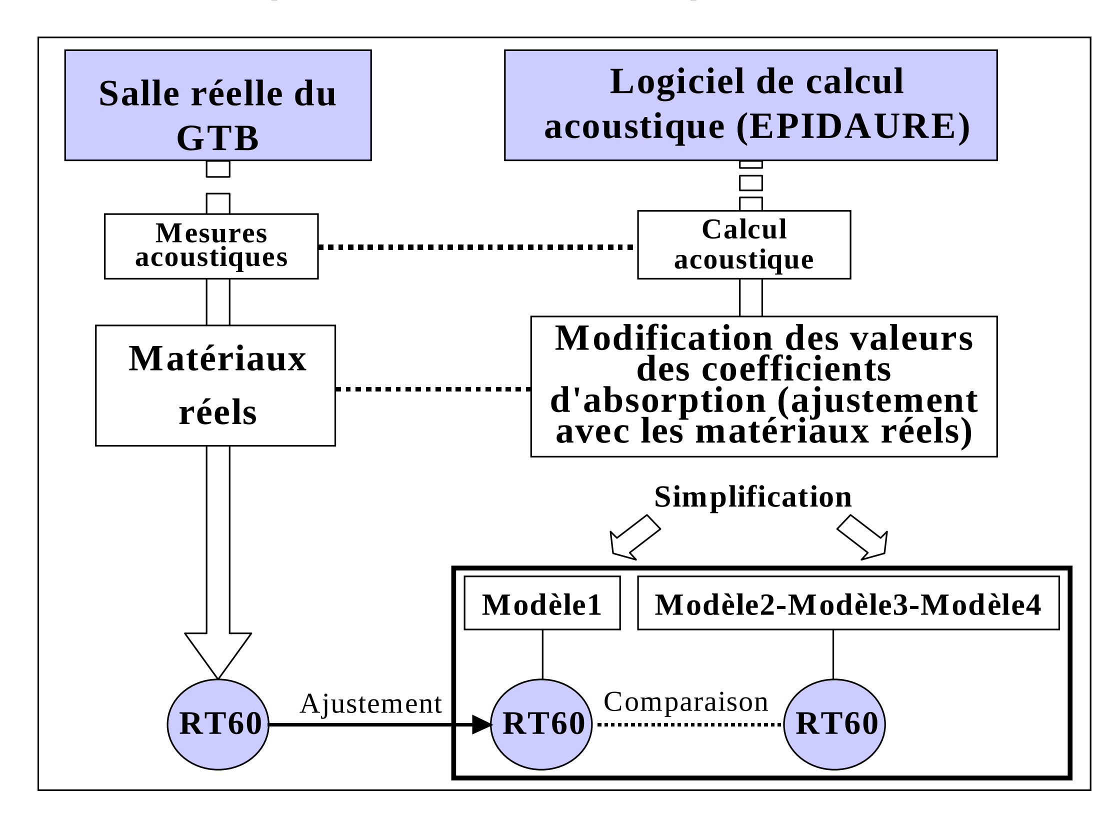
Tous les modèles simplifiés ont été réalisés avec le logiciel de modélisation AutoCAD et le calcul acoustique a été effectué avec le logiciel Epidaure. Les conditions dans lesquelles les mesures acoustiques ont été effectuées sont décrites dans une autre étude [Semidor, 2000].

Tableau 4.9

Processus de comparaison entre mesures acoustiques et calcul acoustique



a. Processus de « comparaison avant ajustement » des résultats acoustiques entre mesures et calcul acoustique [Kouzeleas, 2001a]



b. Processus de « comparaison après ajustement » des résultats acoustiques en ajustant des valeurs des coefficients d'absorption utilisées dans le calcul du 1er modèle avec celles des matériaux réels [Kouzeleas, 2001a]

La comparaison porte sur le Temps de réverbération mesuré au Grand Théâtre de Bordeaux avec celui obtenu par le calcul informatique pour quatre simplifications du modèle architectural de la même salle.

Dans une première approche du processus de comparaison, on compare le Tr60 mesuré « *in situ* » avec le Tr60 obtenu par le calcul informatique pour chaque modèle simplifié en utilisant des valeurs des coefficients d'absorption récupérées par la littérature [Lamoral, 1975] qui s'approchent au mieux des valeurs des vrais matériaux de la salle. Cette première comparaison on la nomme « comparaison avant ajustement » car dans le calcul informatique on utilise les valeurs des matériaux telles qu'elles sont données par la littérature et qui ne sont pas forcement identiques à celles des matériaux reéllement utilisés dans la salle. Cela risque de produire des écarts par rapport aux résultats acoustiques obtenus (entre le Tr60 mesuré et le Tr60 calculé) qui ne sont pas dus à la simplification des modèles mais aux différentes valeurs des vrais matériaux et celles de la littérature (Tableau 4.9a).

Pour cela dans une deuxième approche du processus de comparaison, on modifie les valeurs des coefficients d'absorption des matériaux utilisés dans le calcul informatique acoustique de manière à ce que le Tr obtenu par le calcul sur le modèle simplifié n° 1 (le plus complet) s'ajuste au Tr réel mesuré dans la vraie salle. De cette façon on commence la simplification des modèles à partir des mêmes résultats acoustiques entre mesures et calcul acoustique. Ce « calage du modèle » va assurer que les résultats acoustiques que l'on va obtenir à l'aide du calcul informatique après simplification sur chaque modèle sont dus seulement à l'influence de la simplification de la géométrie modélisée et non à la modification des valeurs des coefficients d'absorption des matériaux dans le calcul. Ensuite on simplifie le modèle n° 1 en trois autres modèles de plus en plus simplifiés. Enfin chaque modèle donne un résultat acoustique (Tr) différent que l'on compare avec le Tr du premier modèle pour mesurer l'influence de la simplification aux résultats acoustiques. Cette deuxième comparaison on la nomme « comparaison après ajustement » (Tableau 4.9b).

4.3.3 « Calage du modèle »

L'ajustement des valeurs des coefficients d'absorption des matériaux utilisés dans le calcul pour rapprocher le mieux les résultats acoustiques des mesures est une étape importante et nécessaire à l'évaluation des résultats du calcul.

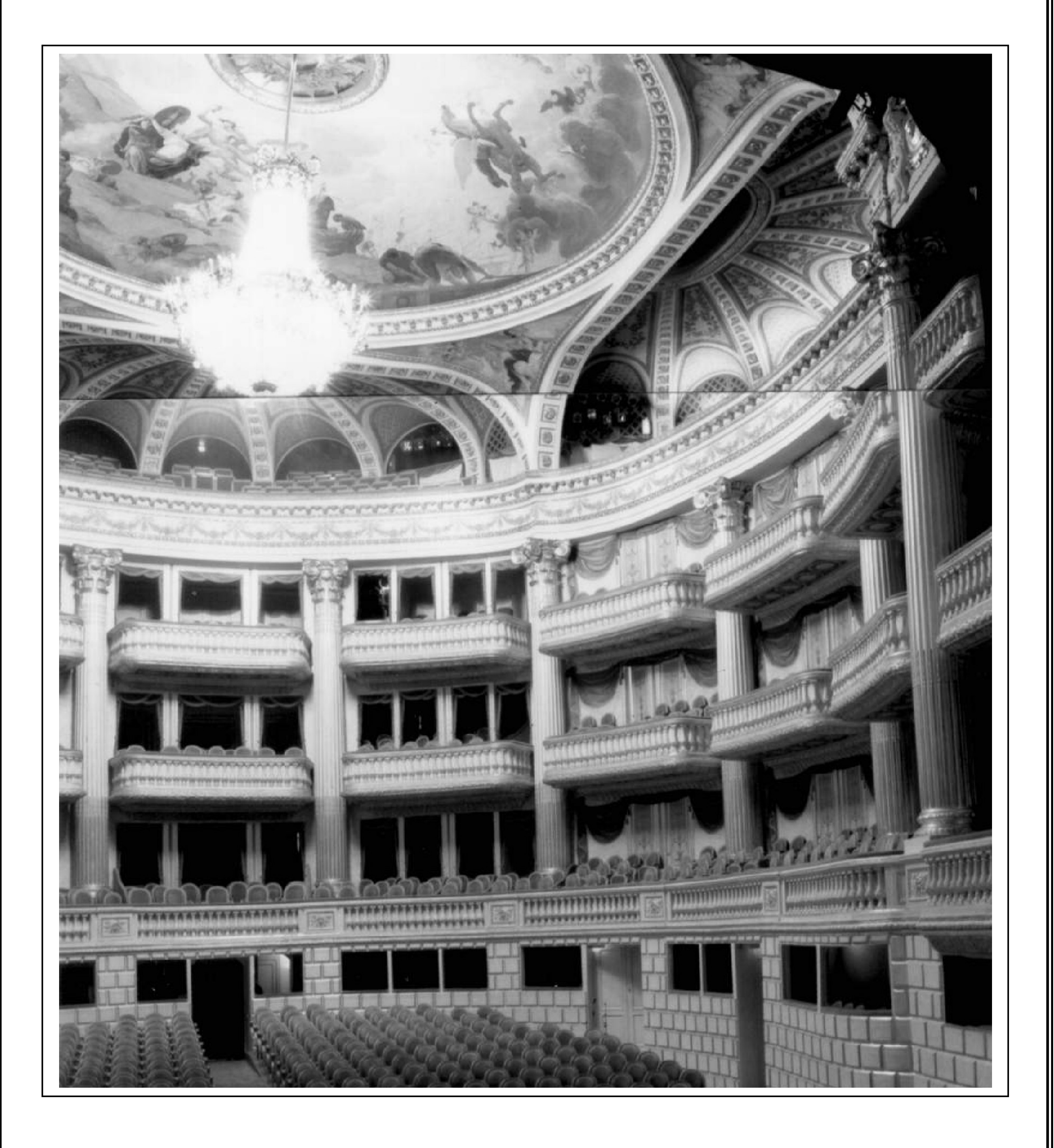
Dans la première étape ce sont les valeurs des matériaux récupérées dans la littérature qui sont utilisées dans la « comparaison avant ajustement » (fig. 10).

Description Matériau	125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz
Revêtement bois avec ornementation	0,35	0,3	0,2	0,1	0,1	0,08
Toile marouflée sur plâtre	0,11	0,09	0,07	0,04	0,04	0,05
Sièges tissu sur plancher bois	0,15	0,3	0,32	0,35	0,35	0,3
Parquet bois collé	0,03	0,04	0,08	0,12	0,12	0,17
Plancher sur lambourdes	0,15	0,1	0,05	0,04	0,04	0,04

Fig. 10 - Valeurs des coefficients d'absorption des matériaux, récupérées dans la littérature et utilisées dans le calcul informatique acoustique

Tableau 4.10

Salle du Grand Théâtre de Bordeaux



a. Intérieur du GTB (photo prise depuis la scène)

Dans la deuxième étape l'ajustement consiste à modifier ces valeurs de façon réaliste par rapport au comportement supposé des matériaux, jusqu'à obtenir des résultats identiques aux mesures sur toutes les fréquences. Cela peut demander plusieurs essais et modifications jusqu'au résultat souhaité (fig. 11)

Description Matériau	125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz
Revêtement bois avec ornementation	0,33	0,27	0,24	0,17	0,17	0,14
Toile marouflée sur plâtre	0,11	0,09	0,07	0,04	0,04	0,05
Sièges tissu sur plancher bois	0,15	0,3	0,37	0,43	0,4	0,38
Parquet bois collé	0,03	0,04	0,08	0,12	0,12	0,2
Plancher sur lambourdes	0,15	0,1	0,05	0,04	0,04	0,04

Fig. 11 - Valeurs des coefficients d'absorption des matériaux, ajustées en fonction des résultats des mesures acoustiques et utilisées dans le calcul informatique acoustique.

4.3.4 Elaboration des modèles

La salle du Grand Théâtre de Bordeaux de 1200 sièges et d'un volume total de 19000 m3 a une forme « fer à cheval » répartie à une superficie de 156 m² au niveau de l'audience et de 576 m² au niveau de la scène (Tableau 4.10). La modélisation de la salle concerne une configuration « cage et fosse fermées » ce qui donne un volume final de 5227 m3.

Le modèle initial le plus approché de la salle réelle comporte 26696 facettes planes (fig. 12). Sa modélisation est basée sur les phases du processus informatique de modélisation présentées auparavant (ß 4.2) [Kouzeleas, 1997]. La simplification de ce modèle devient indispensable pour des limites de nombre de facettes acceptées par le logiciel de calcul Epidaure.

Le modèle n° 1 simplifié comporte 3466 facettes et il est le plus complexe de tous les modèles simplifiés. Ce modèle comporte un tel nombre de facettes qu'il est impossible de le rendre dans son entier pour le calcul. Pour cela on n'utilise que la moitié de la salle modélisée coupée de manière longitudinale et l'autre moitié étant remplacée par une surface parfaitement réfléchissante (fig. 13).

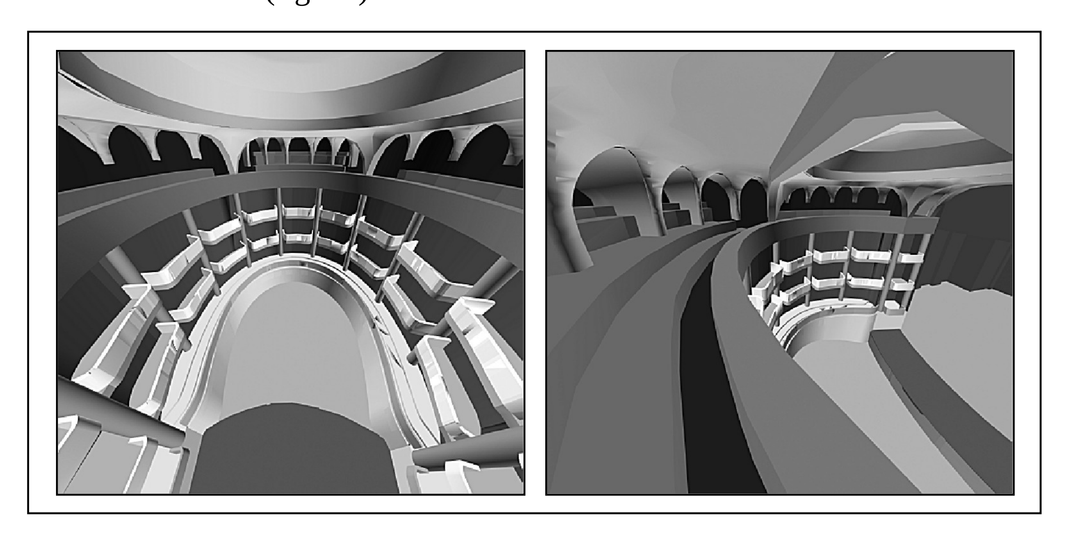
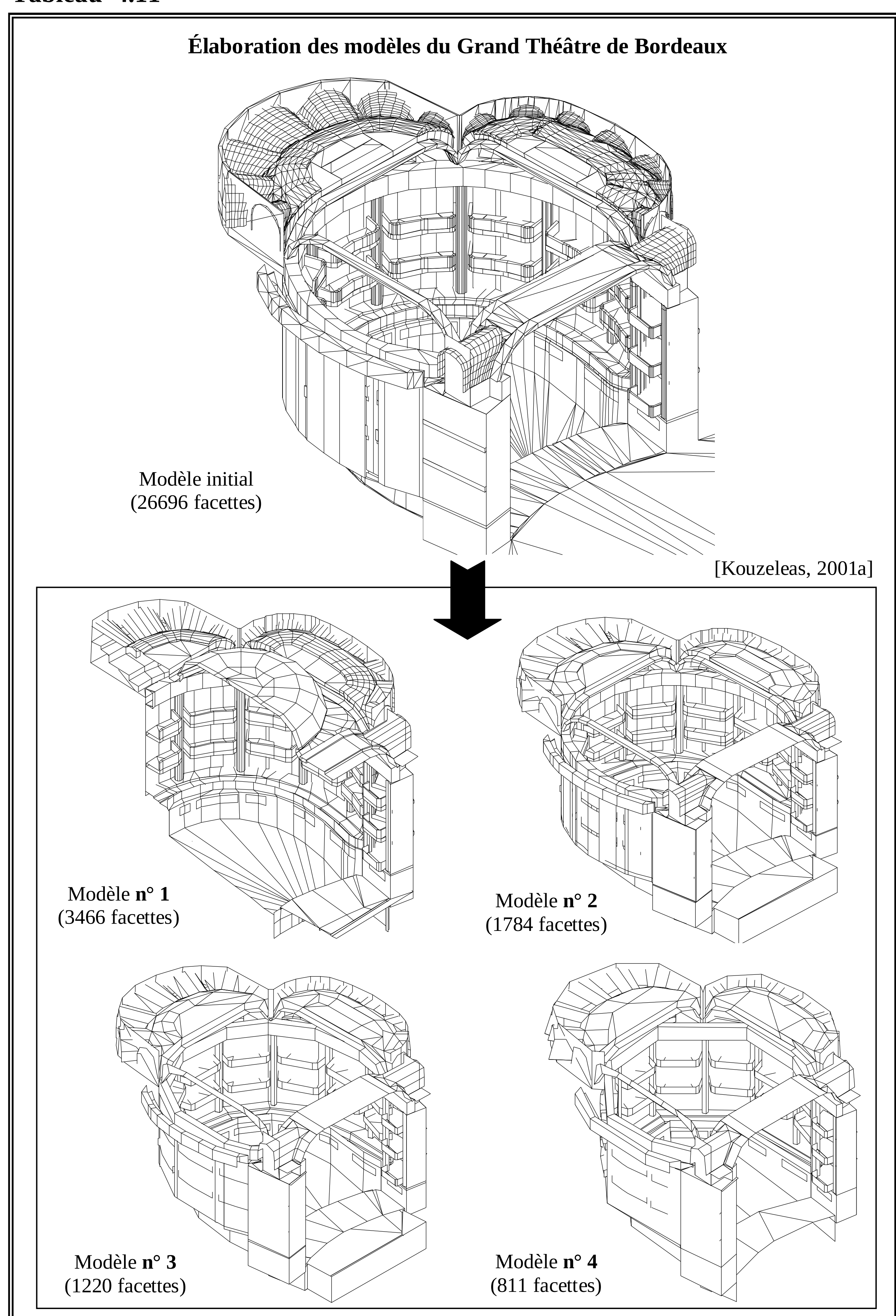


Fig. 12 - Images de synthèse du modèle initial [Kouzeleas, 2001a]

Tableau 4.11


Élaboration des modèles du Grand Théâtre de Bordeaux
Modèle initial
(26696 facettes)
[Kouzeleas, 2001a]
Modèle n° 1
(3466 facettes)
Modèle n° 2
(1784 facettes)
Modèle n° 3
(1220 facettes)
Modèle n° 4
(811 facettes)

Pour cette raison la comparaison que l’on va effectuer est possible seulement si on positionne la source sonore au milieu de la scène sur l’axe qui coupe parfaitement la salle en deux parties. Cette position de la source sonore reste la même sur tous les modèles simplifiés.

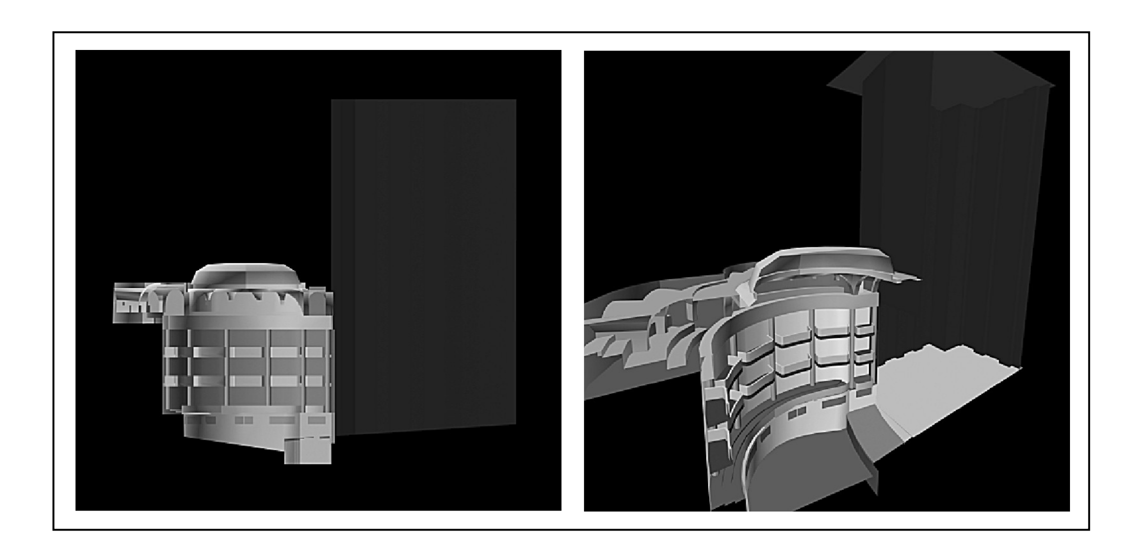


Fig. 13 - Images de synthèse du modèle n° 1 [Kouzeleas, 2001a]

Le modèle n° 2 simplifié comporte 1784 facettes. Son nombre des facettes permet d’utiliser tout entière la salle modélisée dans le calcul ainsi que pour le modèle n° 3 de 1220 facettes et le modèle n° 4 le plus simplifié de seulement 811 facettes. (fig. 14)-(Tableau 4.11) [Kouzeleas, 2001a].

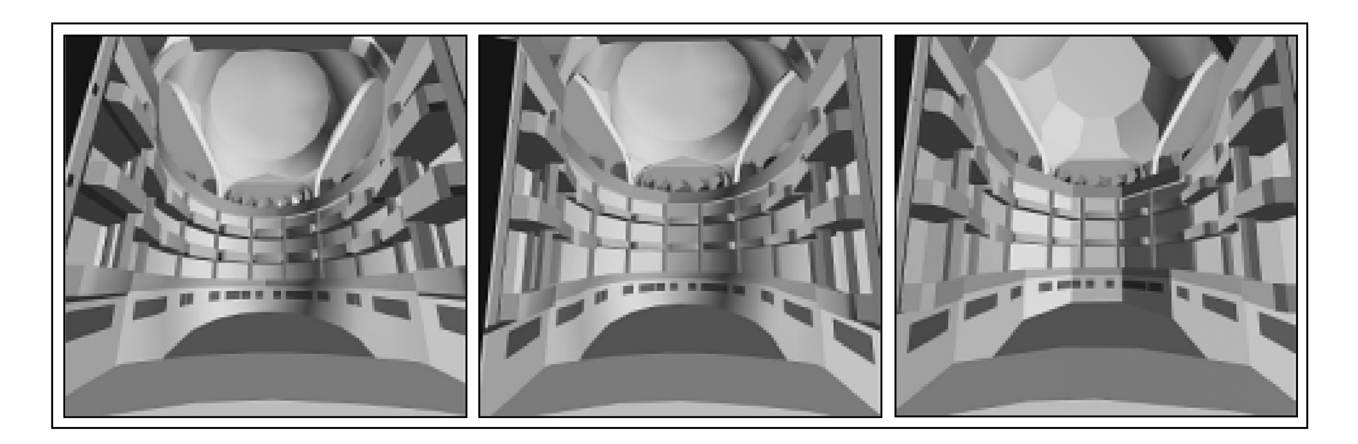


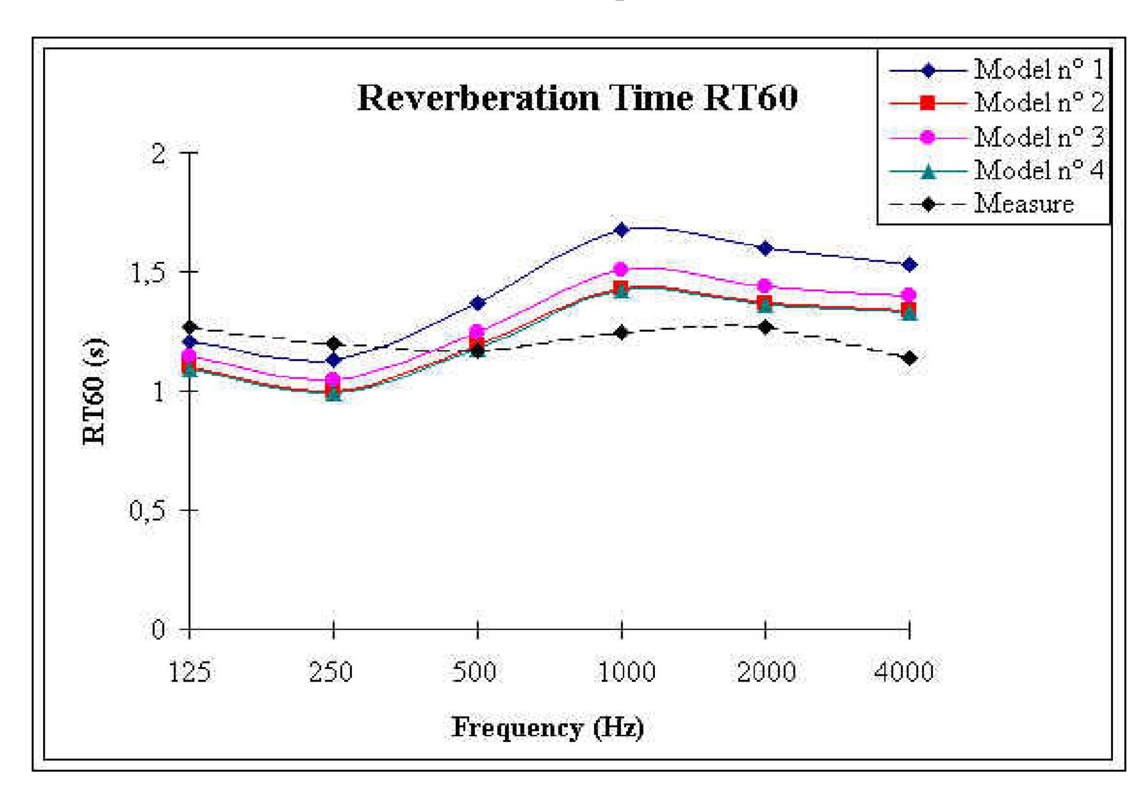
Fig. 14 - Images de synthèse des modèles n° 2, 3, 4 [Kouzeleas, 2001]

Dans cette première comparaison on observe le « décalage » du Tr60 des mesures par rapport aux Tr60 calculés des modèles simplifiés. Cela est dû aux différentes valeurs des coefficients d’absorption utilisées ce qui rend nécessaire le «calage du modèle» pour la comparaison finale des Tr60 entre les modèles. Pendant la simplification des modèles il est important de tenir compte le changement de la surface totale d’absorption de chaque partie de la salle, ce qui a un impact sur les résultats acoustiques (cf. chap. 4.4).

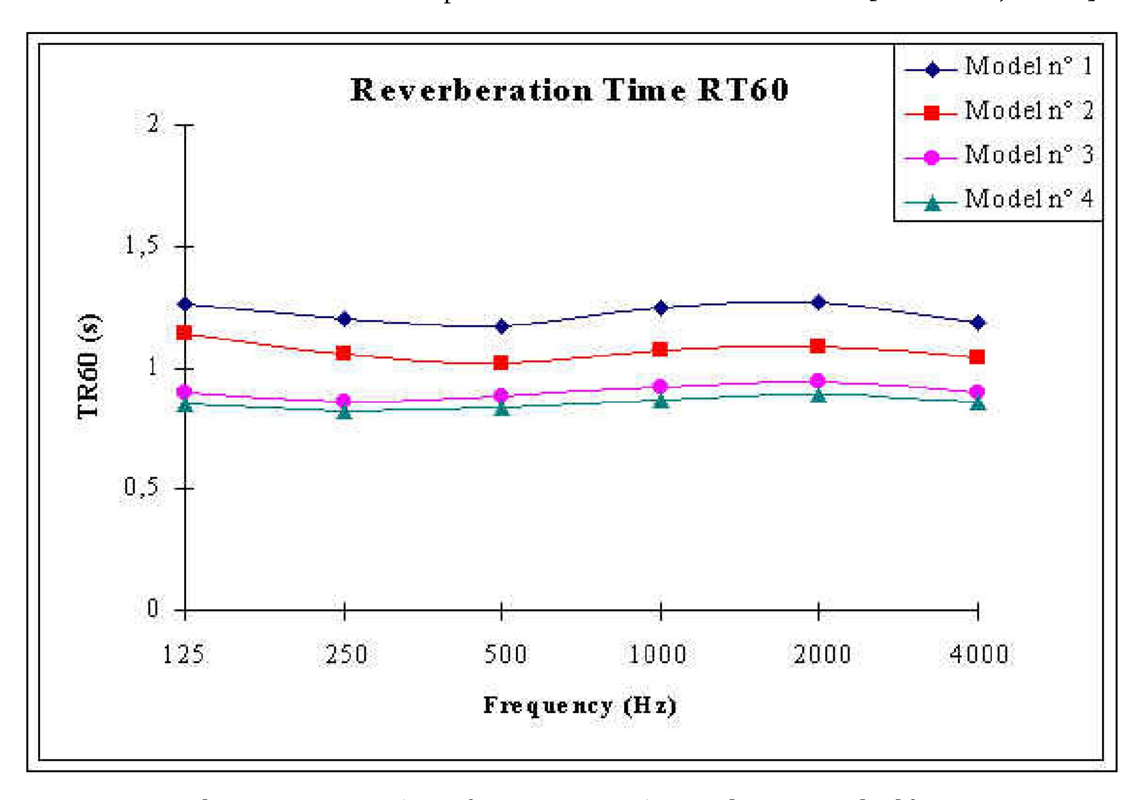
Tableau 4.12



Résultats du calcul de simplification des modèles



a. Comparaison (« avant ajustement ») entre le Tr60 des mesures et le Tr60 calculé sur chaque modèle du plus complexe (n° 1) au plus simplifié (n° 4) en utilisant des coefficients d'absorption des matériaux de la littérature [Kouzeleas, 2001a]



b. Comparaison (« après ajustement ») entre les Tr60 calculés sur chaque modèle du plus complexe (n° 1) au plus simplifié (n° 4) en ajustant les coefficients d'absorption des matériaux avec ceux de la salle [Kouzeleas, 2001a]

4.3.5 Résultats du calcul

La première comparaison (« avant ajustement ») s'effectue entre le Tr60 des mesures et le Tr60 calculé sur chaque modèle du plus complexe au plus simplifié (Tableau 4.12a). Comme déjà expliqué de manière détaillée sur chapitre précédent (cf. chap. 4.3.2) les coefficients d'absorption des matériaux utilisés dans ce calcul sont récupérés dans la littérature [Lamoral, 1975].

La deuxième comparaison (« après ajustement ») s'effectue entre les Tr60 calculés de tous les modèles dans lesquels on utilise les mêmes coefficients d'absorption ajustés avec les matériaux de la salle.

Dans cette comparaison finale on remarque le changement du Tr60 par rapport au modèle simplifié [Kouzeleas, 2001a]. Plus le modèle est constitué d'un nombre faible de surfaces, plus cette simplification de la géométrie de la salle influence considérablement les résultats acoustiques (Tableau 4.12b). Dans le cas de figure de cette étude, plus on simplifie le modèle plus le Tr est faible. Cela varie en fonction des valeurs des coefficients d'absorption dans chaque fréquence, du changement de la surface totale d'absorption du modèle en modèle comparé et de l'approche de simplification (cf. chap. 4.4).

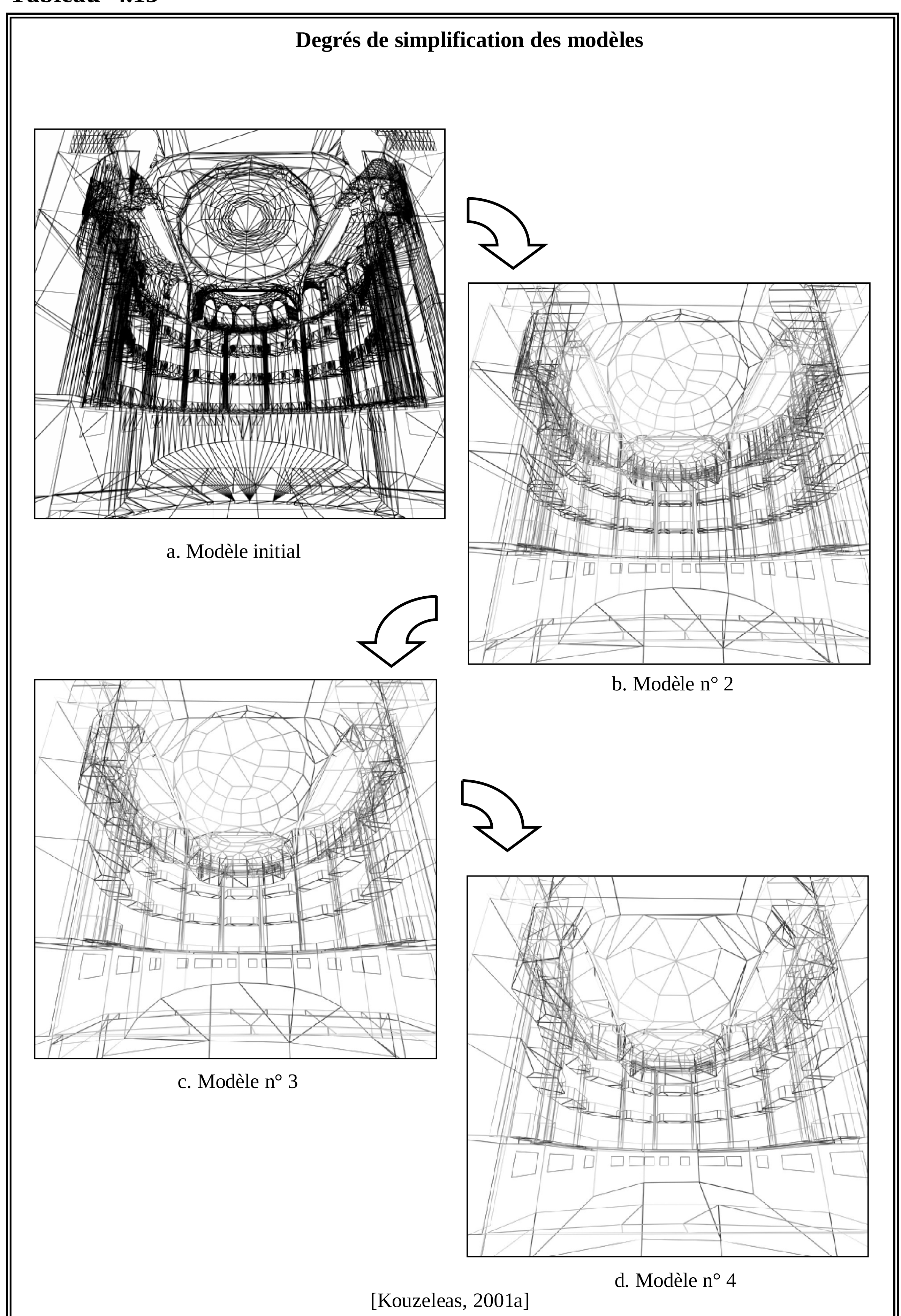
4.3.6 Conclusions

Le changement et la modification dus à la simplification de la forme géométrique modélisée est considérable. Plus on simplifie le modèle architectural, plus les résultats acoustiques sont défarorablement influencés, donc incorrects, ce qui rend le rôle de la simplification du modèle primordial.

Certains logiciels de calcul acoustique acceptent un nombre de facettes très important ou bien illimité dans de cas rares. Même dans ces cas la modélisation numérique implique une simplification nécessaire de la réalité pour des raisons de limites des applications ou de mémoire. Par conséquent, la simplification des modèles influencera toujours les résultats acoustiques.

Tableau 4.13

Degrés de simplification des modèles



a. Modèle initial

b. Modèle n° 2

c. Modèle n° 3

d. Modèle n° 4

[Kouzeleas, 2001a]

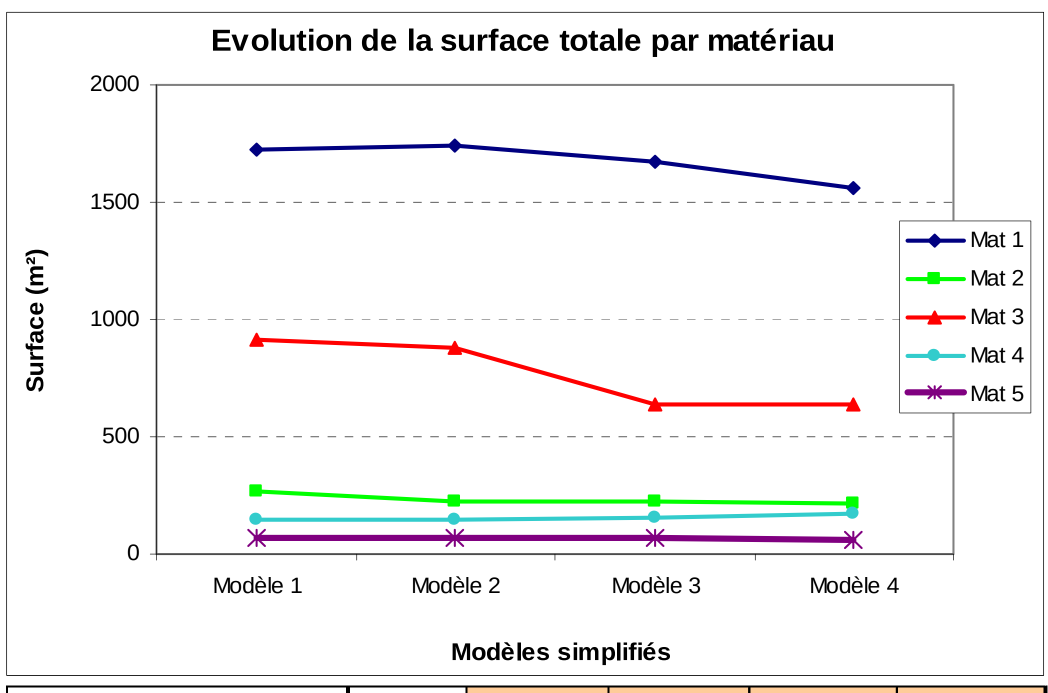
4.4 Analyse des conséquences de la simplification d'un modèle architectural sur les résultats acoustiques

4.4.1 Introduction

Cette étude analyse les conséquences de la simplification des modèles du Grand Théâtre de Bordeaux présentés précédemment (cf. chap. 4.3). Elle présente la manière dont la géométrie de la salle et les résultats acoustiques sont influencés, des éléments de la géométrie impactés et des principes de la méthode de simplification [Kouzeleas, 2001b]

4.4.2 Comparaison des surfaces après simplification

Après la simplification du modèle architectural pour simulation acoustique, une première partie de cette étude comparative présente les conséquences concernant la modification de la surface totale des facettes par matériau. Cette surface totale par matériau après la simplification du modèle, présente souvent une légère diminution par rapport à celle avant simplification (fig. 15).

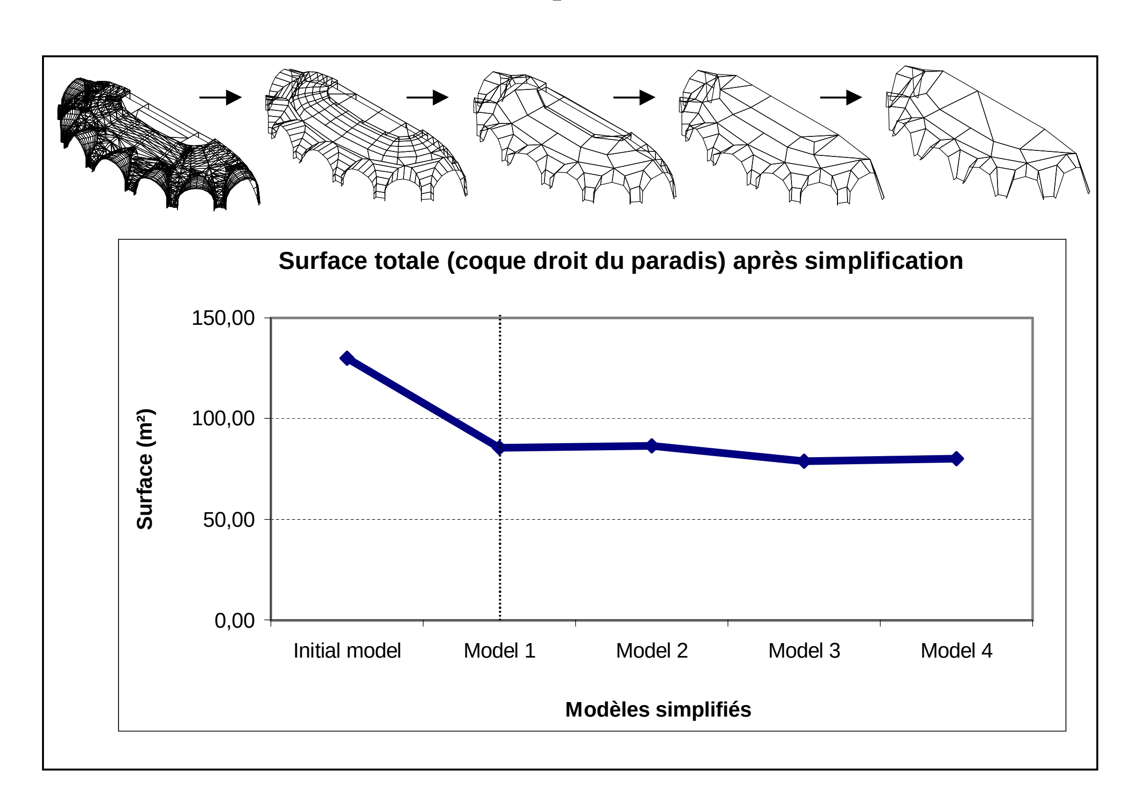


Déscription de matériau	Surface	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 4
Revêtement bois avec ornementation	Mat 1	1723,96	1745,66	1669,62	1556,87
Toile marouflée sur plâtre	Mat 2	267,02	227,3	227,3	216,44
Sièges tissu sur plancher bois	Mat 3	917,5	878,56	640,9	637,89
Parquet bois collé	Mat 4	150,64	146,01	152,49	169
Plancher sur lambourdes	Mat 5	71,84	69,28	69	62,63
	Total	**3130,96**	**3066,81**	**2759,31**	**2642,83**

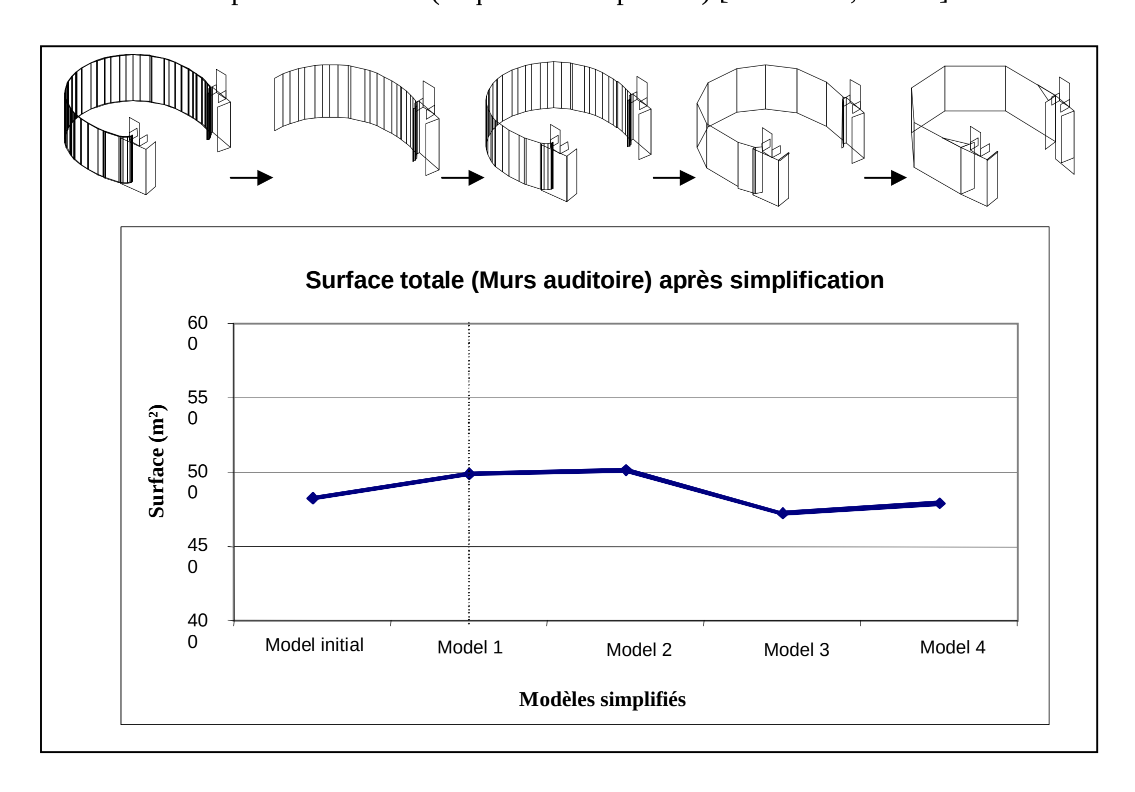
Fig. 15 - Surface totale occupée par matériau après simplification du modèle le plus complexe (n° 1) au modèle le plus simplifié (n° 4)) [Kouzeleas, 2001b]

Tableau 4.14

Evolution de la surface totale de la simplification évolutive d'une partie de la salle



a.Evolution de la surface totale de la simplification évolutive d'une partie de la salle (coque droit du paradis) [Kouzeleas, 2001b]



b.Evolution de la surface totale de la simplification évolutive d'une partie de la salle (murs auditoire) [Kouzeleas, 2001b]

Cette modification n'est pas toujours très significative et elle dépend de la position, la disposition et répartition du matériau dans la salle. Cela est justifié par l'exemple de la disposition de deux matériaux, où le premier « revêtement bois avec ornementation » présente une diminution de 9,69 % de sa surface totale après simplification, tandis que le second matériau « parquet bois collé » présente une augmentation de 12,18 % de sa surface totale après la même simplification (fig. 15). Cette modification de la surface totale par matériau peut influencer de manière significative les résultats acoustiques parce qu'elle modifie l'analogie des surfaces réfléchissantes par rapport aux surfaces d'absorption de la salle.

Ce résultat, est dû, d'un coté, à la disposition et la position différente de ces deux matériaux examinés qui influencent de manière plus au moins importante la modification de la surface totale des facettes après simplification et de l'autre coté est dû au voisinage de certaines parties de la salle qui sont plus ou moins affectées par la simplification. Cela signifie très souvent que plus une partie de la salle est simplifiée, plus elle génère une simplification importante à la partie voisine (fig. 16).

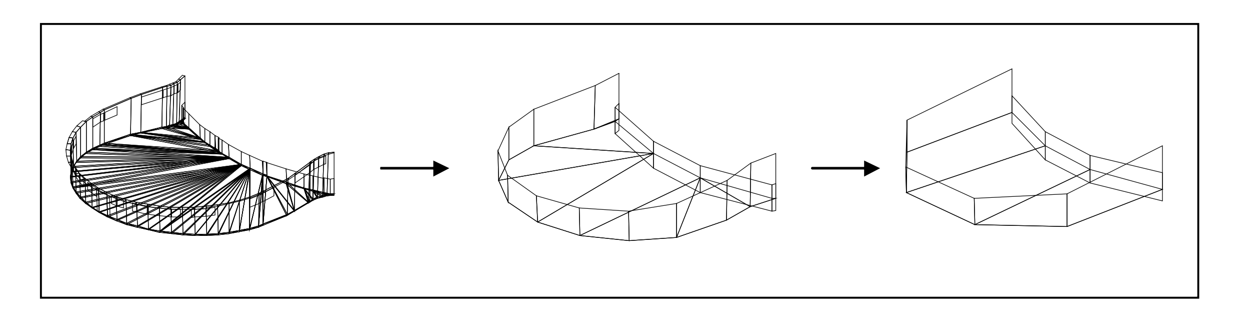


Fig. 16 – Influence de la simplification d'une partie de la salle (murs auditoire) à la partie voisine (parterre auditoire) [Kouzeleas, 2001b]

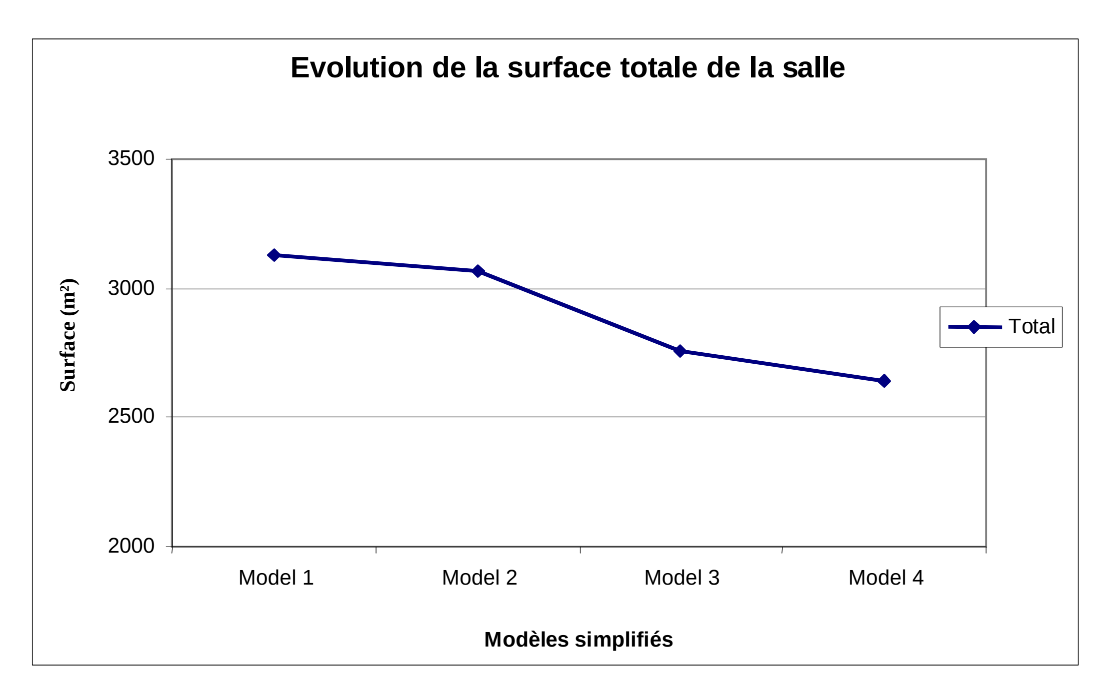
Pourtant on peut observer que la surface totale des parties de plus en plus simplifiées ne change pas considérablement. Quelques exemples illustrent bien cette évolution (Tableau 4.14).

Les paramètres les plus importants après simplification des modèles sont la surface totale de la salle simplifiée et son volume. Ces paramètres influencent considérablement certains critères objectifs comme le Temps de Réverbération etc... L'illustration suivante présente l'évolution de la surface totale de chacun des modèles (Tableau 4.15a).

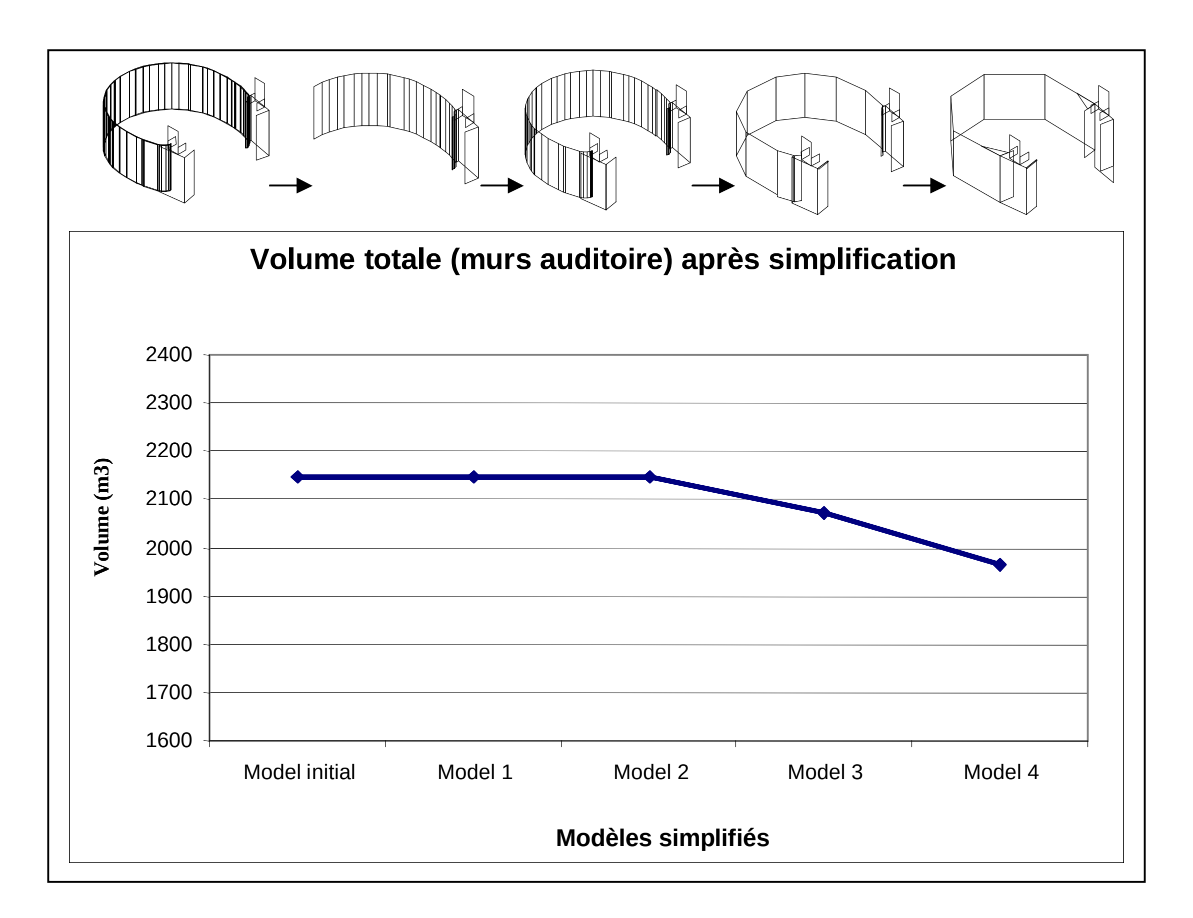
Pendant et après la simplification du modèle, la diminution de la surface totale est presque inévitable. Dans ce cas examiné, cette diminution est 15,6 % en commençant par le modèle le plus complexe (n° 1) pour aller au modèle le plus simplifié (n° 4). Cela, par conséquent, génère une diminution du volume total du modèle (Tableau 4.15b). L'analogie entre la surface totale et le volume peut générer des valeurs différentes du Temps de Réverbération examiné dans cette étude et bien évidemment influencer d'autres critères objectifs. Dans plusieurs cas, plus on simplifie le modèle, plus on fait baisser le Tr (Tableau 4.12b), car très souvent la diminution du volume est moins significative que la diminution de surface totale.

Tableau 4.15





a. Evolution de la surface totale de la simplification évolutive des quatre modèles [Kouzeleas, 2001b]



b. Evolution du volume totale de la simplification évolutive d'une partie de la salle (murs auditoire) [Kouzeleas, 2001b]

4.4.3 Principes des méthodes de simplification

La simplification de chaque modèle a été réalisée manuellement. La méthode manuelle est souvent inévitable à cause de la structure complexe des surfaces courbes et l'irrégularité de chaque facette qui constitue la surface courbe et toute la salle modélisée. La méthode manuelle de simplification est souvent moins dangereuse qu'une méthode numérique appliquée par une application spécifiquement développée parce qu'il est très difficile d'appliquer la même approche de simplification et d'homogénéiser des parties différentes qui ont été modélisées de manière différente (ex : les formes cylindriques, les surfaces gauches, etc...)

Pourtant, afin d'optimiser les résultats acoustiques les plus approchés du modèle initial, nous devons tenir compte certains principes :

- Le premier principe pendant la simplification consiste à conserver la surface et le volume de la partie simplifiée au plus proche possible du modèle initial. Pour cela, la technique de remplacement de deux ou plusieurs facettes par une facette est très utile, à condition qu'à chaque fois la surface totale ne change pas considérablement après simplification (Tableau 4.15a), en donnant priorité aux jonctions des facettes qui affectent le moins possible la diminution du volume (Tableau 4.16a).

- Le second principe consiste à conserver la direction de la somme des normales des facettes remplacées le plus parallèle possible avec la normale de la nouvelle facette. Cela doit tenir compte la rotation et la position de la facette dans l'espace tridimensionnel. Il est beaucoup plus facile d'appliquer cette approche à des simples surfaces courbes comme les surfaces cylindriques qu'à des surfaces gauches (Tableau 4.16b).

- Le troisième principe consiste à essayer de conserver la symétrie de la surface courbe simplifiée par rapport au même axe si la courbe initiale est aussi symétrique avant la simplification (Tableau 4.16c).

- Le dernier principe consiste à appliquer la simplification à toutes les parties du modèle et surtout au même degré, même si la simplification de certaines parties affecte de manière conséquente d'autres parties voisines (cf. chap. 4.4.2. – fig. 16).

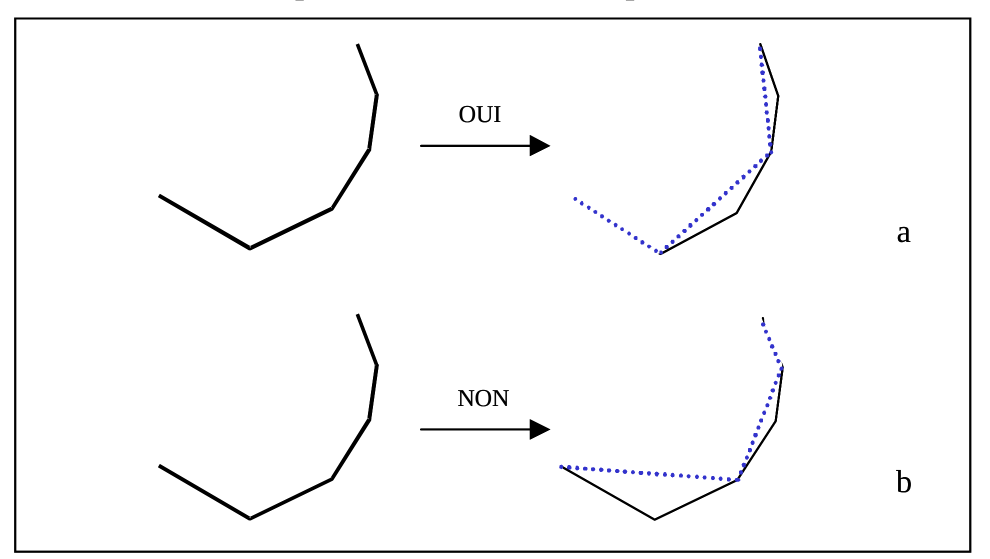
4.4.4 Conclusions

Pendant et après une importante simplification d'un modèle, la diminution de la surface et du volume total est presque inévitable et par conséquent les résultats acoustiques calculés seront différents des mesures effectuées « *in situ* ». Pour cela certains principes des méthodes de simplification des modèles peuvent influencer et optimiser considérablement les résultats acoustiques.

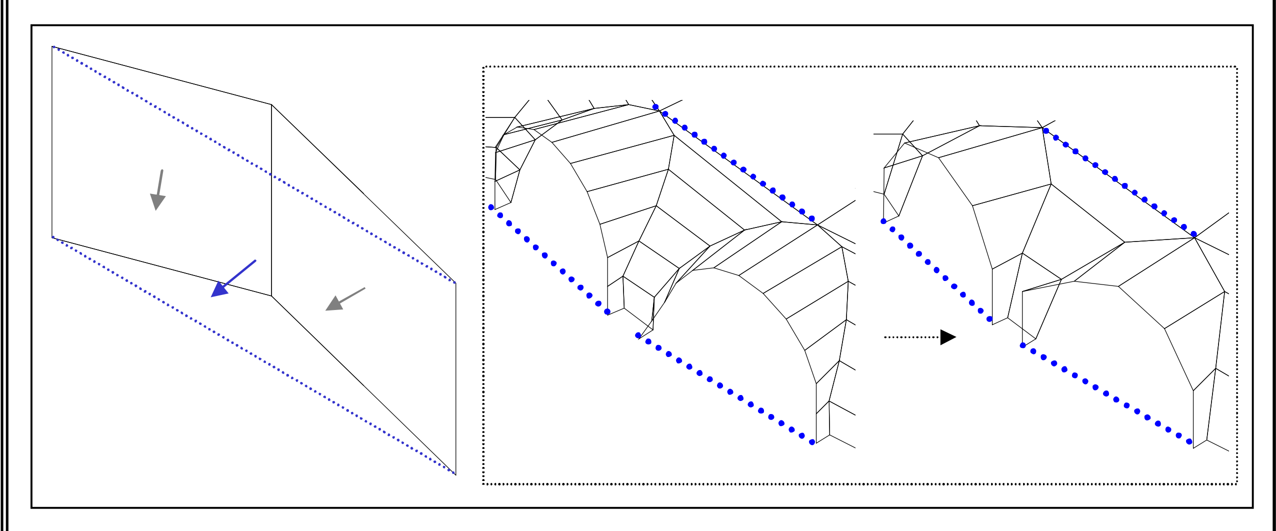
En cas de structure complexe des surfaces la méthode manuelle de simplification représente l'avantage de contrôler l'impact de l'intervention et de « particulariser » l'irrégularité et la complexité différente des parties modélisées de la salle.

Tableau 4.16

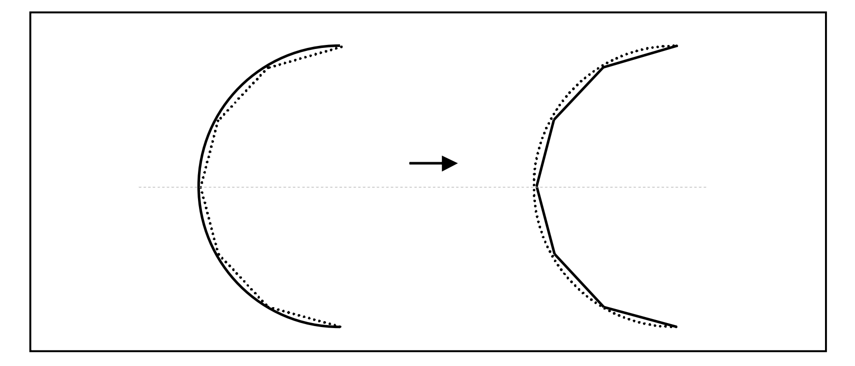
Principes des méthodes de simplification



a. Méthode de simplification afin de conserver la surface et le volume de la partie simplifiée au plus proche possible du modèle initial [Kouzeleas, 2001b]



b. Méthode de simplification afin de conserver la rotation et la position des facettes après simplification le plus parallèle possible du modèle initial [Kouzeleas, 2001b]



c. Méthode de simplification afin de conserver la symétrie de la surface courbe avant et après simplification [Kouzeleas, 2001b]

4.4.5 Réflexions entre modélisation et simplification

La simplification d'un modèle en vue de simulation acoustique est inévitable et nécessaire. Mais une simplification non contrôlée et poussée peut avoir des répercutions négatives sur les résultats acoustiques comme on l'a déjà constaté précédemment dans le même chapitre. Par conséquent cette simplification doit se faire de façon prudente et limitée. Mais où se trouve la limite d'une telle simplification ? Quels sont les facteurs qui déterminent les limites de simplification ?

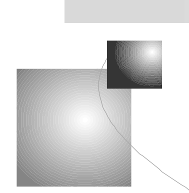
Un modèle architectural en vue de simulation acoustique, dont la modélisation se rapproche au mieux de la réalité, alors le moins simplifié possible, peut souvent donner des résultats acoustiques fiables. Pour que cela se réalise, plusieurs conditions doivent être réunies, comme des problèmes de mémoire informatique résolus, d'acceptation de nombre de facettes étendu, vitesse de calcul informatique puissante etc... Dans ce cas, souvent d'un coté un grand nombre d'éléments modélisés n'est pas indispensable pour effectuer le calcul acoustique et de l'autre coté certains éléments ne sont même pas tenus en compte et « vus » par le calcul acoustique. Il s'agit des éléments architecturaux qui jouent un rôle souvent esthétique et moins souvent fonctionnel, mais très important dans la conception architecturale. Pour des raisons de petites dimensions d'éléments modélisés, des algorithmes de calcul ou bien des phénomènes acoustiques, certains de ces éléments architecturaux ne sont pas tenus en compte par le calcul acoustique. Dans ce cas, et si les conditions informatiques le permettent, ces éléments architecturaux *peuvent faire partie de l'ensemble de modélisation*, n'ayant pas de répercussions négatives sur les résultats acoustiques et tout en étant des éléments très importants pour l'architecte.

Au cas où certains d'éléments architecturaux modélisés dans la salle en vue de simulation acoustique sont pris en compte par le logiciel acoustique, tout en étant un obstacle pour un calcul acoustique correct, ils doivent être simplifiés. *Cette limite de simplification peut être la limite du logiciel acoustique de « prendre en compte » et de « lire » de petites dimensions des entités modélisées.* Ces entités peuvent alors ne pas être modélisées comme un certain nombre d'éléments qui sont dépassés par d'autres limites du logiciel acoustique. Il n'est pas utile que la simplification du modèle dépasse la capacité du logiciel afin d'accepter des modèles plus complets et proches à la réalité.

Un équilibre entre modélisation complète et simplification peut se trouver alors à toutes les limites informatiques du logiciel acoustique. Cela varie avec logiciels de simulation acoustique. Malheureusement souvent la même simplification du modèle ne donne pas les mêmes résultats acoustiques à travers différents logiciels acoustiques car leurs limites d'acceptation des modèles diffèrent. Pour cela on ne peut pas prétendre facilement qu'il y a un modèle et une limite idéale de simplification car cela dépend du logiciel de simulation acoustique en question. Ce que l'on peut affirmer c'est qu'une modélisation de la réalité nécessite forcement une simplification de la multitude des informations existantes et que *cette simplification doit s'effectuer de manière limitée en fonction des limites du logiciel de simulation acoustique* afin de respecter au mieux possible la conception architecturale.

Chapitre 5

Traduction architecturale et évaluation des résultats acoustiques



5. Traduction architecturale et évaluation des résultats acoustiques

5.1 Introduction

5.2 Présentation du module de traduction architecturale des résultats acoustiques

5.2.1 Calcul avec évaluation des valeurs des critères objectifs

5.2.1.1 Calcul avec évaluation d'un critère objectif d'une salle sous toutes les bandes de fréquences

5.2.1.2 Evaluation d'un critère objectif de plusieurs salles sous une seule bande de fréquence

5.2.1.3 Calcul avec évaluation de plusieurs critères objectifs d'une salle sous une seule bande de fréquence

5.2.2 Récupération des valeurs des critères objectifs

5.2.3 Présentation des valeurs des critères objectifs

5.2.3.1 Présentation d'un critère objectif d'une salle sous toutes les bandes de fréquence

5.2.3.2 Présentation d'un critère objectif de plusieurs salles sous une bandes de fréquence

5.2.3.3 Présentation de plusieurs critères objectifs à la fois d'une salle sous une bande de fréquence

5.3 Conclusions

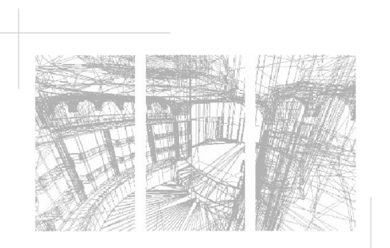
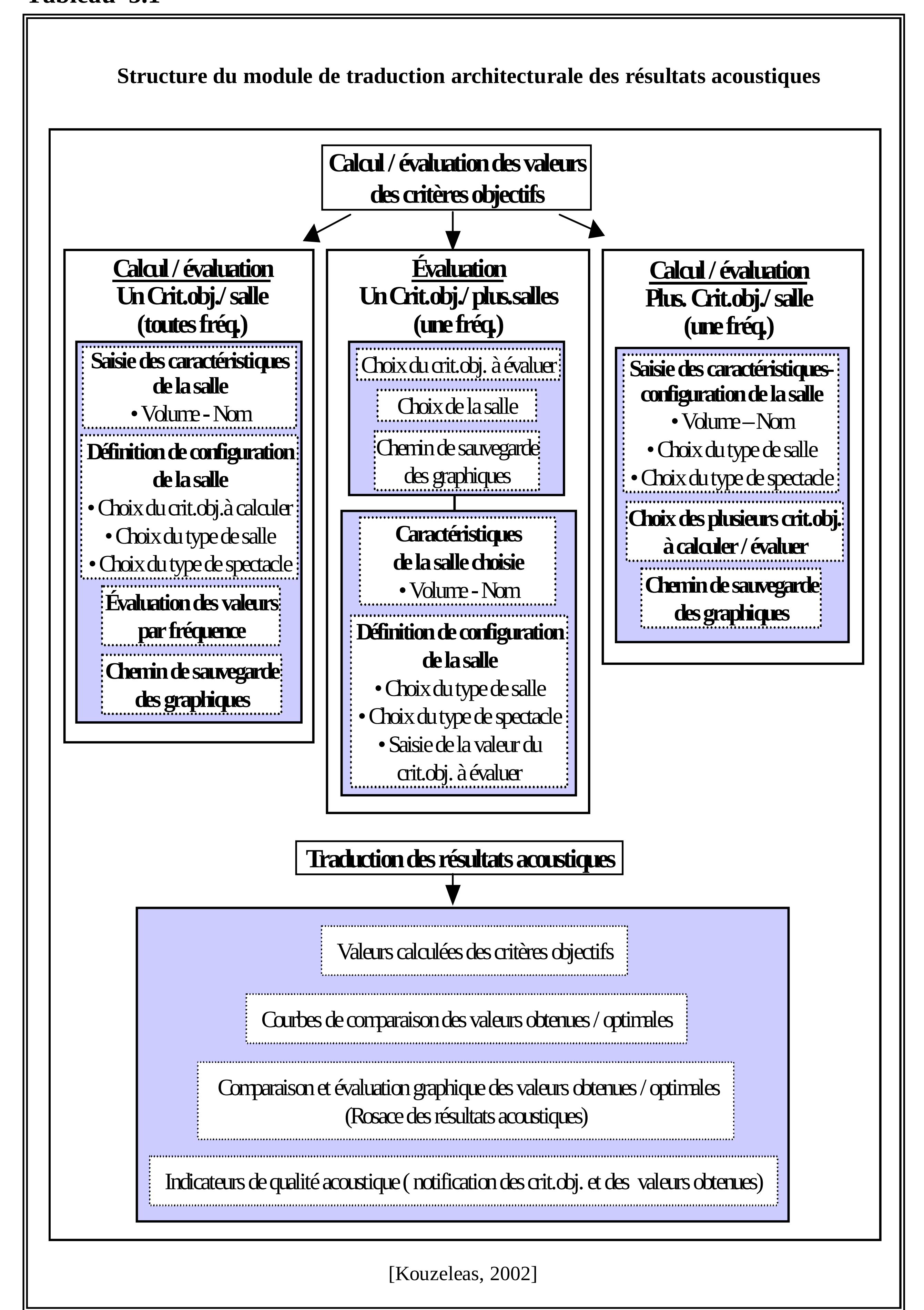


Tableau 5.1



[Kouzeleas, 2002]

5.1 Introduction

Un des protagonistes principaux influençant la qualité acoustique d'une salle est incontestablement l'architecte et parfois sans même le savoir. La conception architecturale d'une salle et tout ce que cela comporte à savoir son utilisation, la géométrie, le volume, la disposition des éléments architecturaux, la construction etc..., joue un rôle déterminant à l'élaboration d'une certaine qualité acoustique à l'aide d'un expert acousticien et par fois malheureusement à la correction acoustique une fois la salle conçue et construite par un architecte n'ayant pas de connaissance acoustique et sans aide d'un acousticien.

Cette traduction architecturale des résultats acoustiques n'a comme objectif de remplacer ni l'acousticien conseiller ni non plus la connaissance acoustique indispensable afin de rendre une salle acoustiquement correcte. La finalité de cette traduction architecturale est d'abord de donner des moyens à l'architecte d'apprécier et d'évaluer les résultats acoustiques. Ensuite, d'avoir une aide de base pendant la conception architecturale de la salle afin d'arriver à un résultat mieux « exploitable » par la collaboration architecte-acousticien. Enfin, de pouvoir construire une base de dialogue un langage plus tangible pour l'architecte afin de mieux dialoguer avec l'acousticien.

Cette étude [Kouzeleas, 2002] présente les résultats de la simulation acoustique sous forme graphique et traduit ces résultats de manière compréhensible et architecturale en comparant les résultats obtenus avec les résultats optimaux afin de les évaluer. Cette traduction architecturale se fait en fonction des différents éléments comme le volume de la salle, le type de spectacle, les valeurs acoustiques optimales etc… Une partie de la traduction architecturale peut servir à la pédagogie, à travers des présentations et des explications des éléments architecturaux (salles - formes-diagrammes) en fonction du comportement acoustique (lancement des rayons- réflexions- comparaisons des résultats etc...). (cf. chap. 6). L'autre partie est destinée à être utilisée plus comme un outil de présentation et d'évaluation des résultats à travers des courbes de comparaison, des critères objectifs présentés, etc..., tout en restant un outil de calcul.

5.2 Présentation du module de traduction architecturale des résultats acoustiques

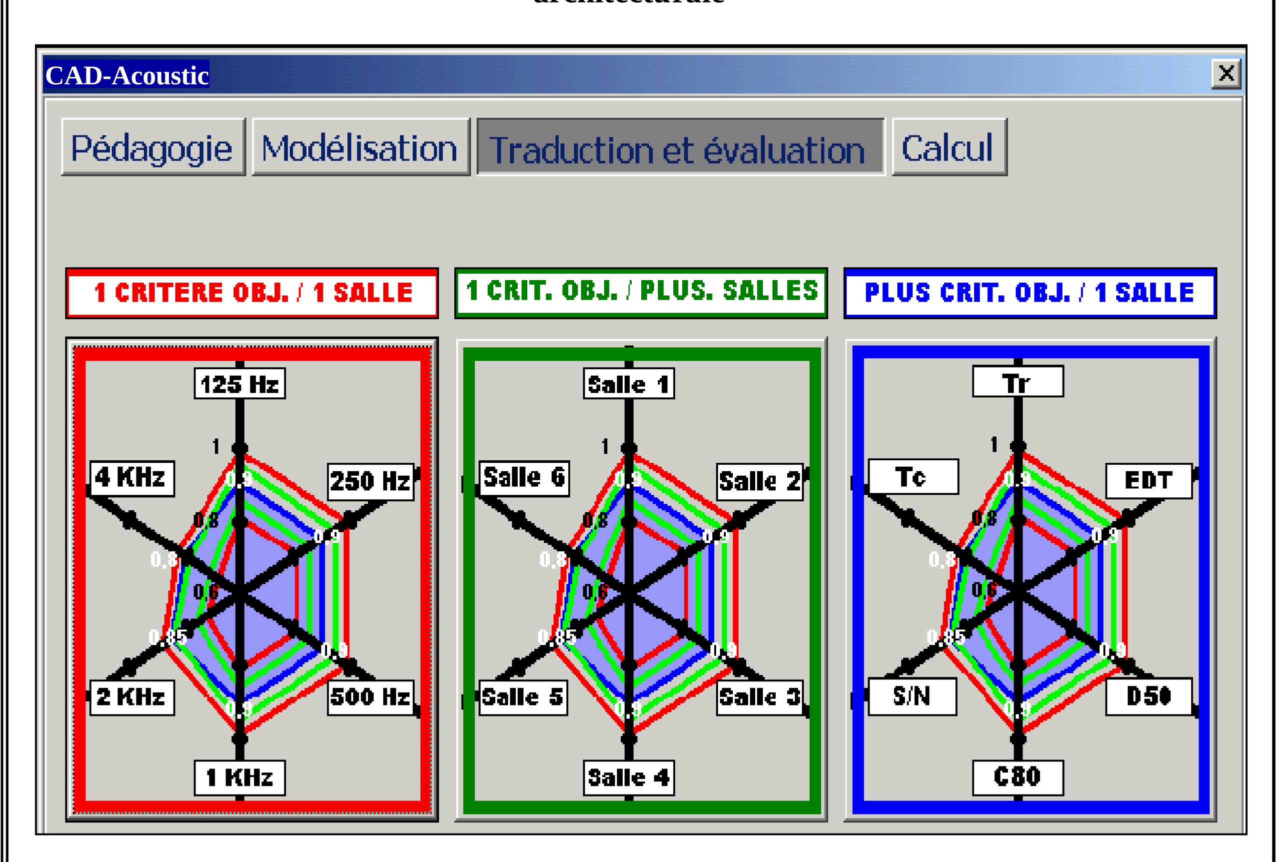
Le module de traduction architecturale des résultats acoustiques est à la fois un outil de présentation, d'évaluation et de calcul des résultats acoustiques. Ce module est également une plate-forme d'intégration des moteurs de calcul acoustique externes et de récupération des valeurs externes à évaluer. En même temps il peut être utilisé en tant qu'outil pédagogique.

Les résultats acoustiques sont présentés en fonction de l'aptitude du moteur de calcul intégré ou adapté à calculer un certain nombre d'entre eux.

Ce module consiste d'abord à récupérer le(s) résultat(s) de(s) critère(s) objectif(s) du calcul, à les comparer avec des valeurs optimales en fonction des éléments architecturaux et à

Tableau 5.2

Types de présentation des résultats acoustiques – Module de traduction architecturale



a. Le module de traduction et évaluation des valeurs des critères objectifs sous forme de boite de dialogue et intégré dans la plate-forme globale d'aide en simulation acoustique proposée [Kouzeleas, 2002]

1 CRITERE OBJ. / 1 SALLE	b. Accès au calcul et à l'évaluation sous forme graphique comparative d'un seul critère objectif d'une seule sur toutes les fréquences
1 CRIT. OBJ. / PLUS. SALLES	c. Accès au calcul et à l'évaluation sous forme graphique comparative d'un seul critère objectif de plusieurs salles à la fois sur la bande de fréquence de 1000 KHz.
PLUS CRIT. OBJ. / 1 SALLE	d. Accès au calcul et à l'évaluation sous forme graphique comparative de plusieurs critères objectifs simultanément de la même salle sur la bande de fréquence de 1000 KHz.

les présenter sous forme graphique de « rosace de résultats acoustiques» présentés ultérieurement.

En même temps une autre utilisation du module de la traduction architecturale consiste également à saisir des valeurs non calculées de différents critères objectifs par bande de fréquence afin de les évaluer et les situer par rapport aux valeurs optimales.

La structure de ce module de calcul, de présentation et d'évaluation des valeurs des critères objectifs de manière traduite et architecturale est illustrée dans le Tableau 5.1.

5.2.1 Calcul avec évaluation des valeurs des critères objectifs

Le calcul avec évaluation des valeurs des critères objectifs se compose de trois types [Kouzeleas, 2002]. Dans chaque type le critère objectif calculé est présenté sous forme graphique d'une comparaison avec des valeurs optimales filtrées par des éléments architecturaux. A travers tous les types de calcul sans exception on peut évaluer différentes valeurs affectées à des critères objectifs sans forcement les calculer. Les trois types de calcul et d'évaluation des valeurs concernent :

- un critère objectif d'une salle sous toutes les bandes de fréquences,
- un critère objectif de plusieurs salles sous une seule fréquence (1000 Hz) et
- plusieurs critères objectifs d'une salle sous une seule fréquence (1000 Hz) (Tableau 5.2a).

Le module présenté qui est un outil d'aide en simulation acoustique dispose de son propre moteur de calcul acoustique en générant ses propres valeurs de certains critères objectifs. Néanmoins l'importance majeure est due au fait que tout moteur de calcul acoustique sophistiqué, puissant et performant peut être adaptable au logiciel de modélisation à travers une plate-forme globale d'aide en simulation acoustique qui intègre toute étude ici développée comme cela est explicitement présenté ultérieurement (cf. chap. 6). Par conséquent ce module peut aussi récupérer les valeurs calculées par le moteur de calcul adapté.

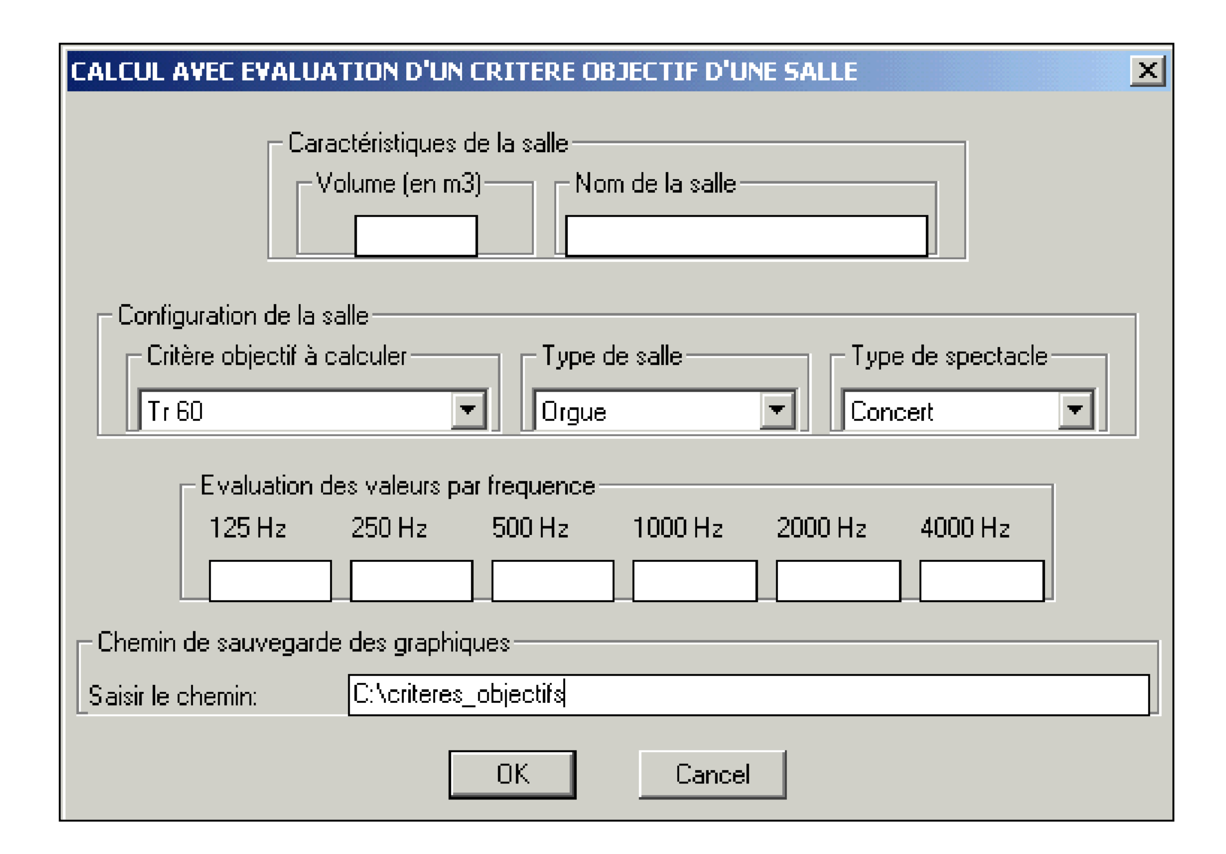
5.2.1.1 Calcul avec évaluation d'un critère objectif d'une salle sous toutes les bandes de fréquences

Le calcul avec évaluation de tout critère objectif d'une salle passe par la boite de dialogue principale de traduction et évaluation des résultats acoustiques (Tableau 5.2a) et le choix de la fenêtre d'accès « 1 critère obj. / 1 salle » (Tableau 5.2b).

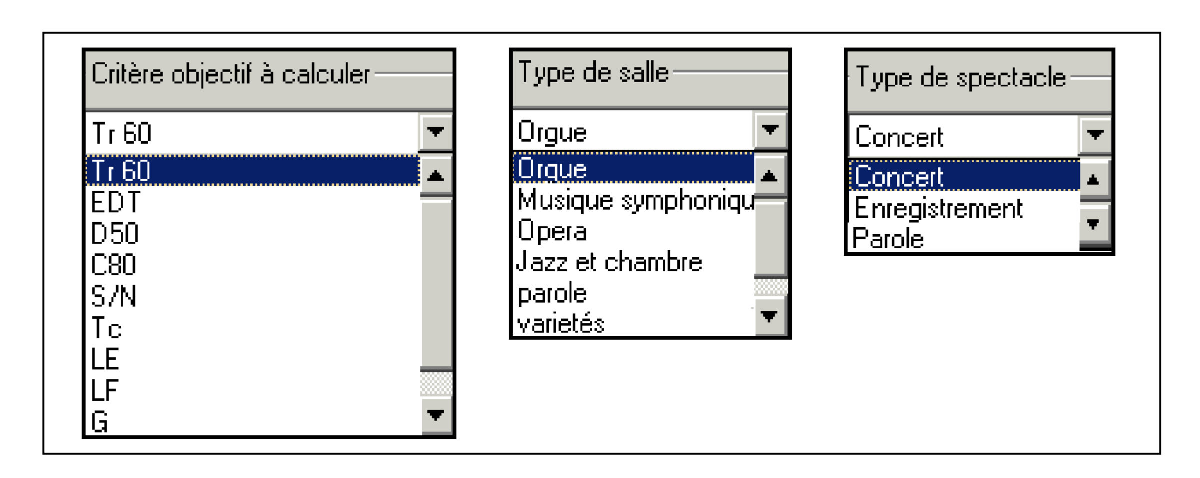
Les valeurs calculées soit par le propre calcul de l'outil ici présenté, soit par le moteur de calcul adapté, sont générées en format ASCII par bande de fréquence par l'intermédiaire d'une boite de dialogue qui succède la fenêtre principale d'accès au calcul. A travers cette boite de dialogue on a la possibilité de définir certains éléments architecturaux qui affectent considérablement le critère objectif à calculer d'une salle (Tableau 5.3a).

Tableau 5.3

Définition des éléments architecturaux dans le calcul et l'évaluation d'un critère objectif d'une salle



a. Boite de dialogue de calcul d'un critère objectif d'une salle en fonction des éléments architecturaux tels que le volume, le type de salle et le type de spectacle [Kouzeleas, 2002]



b. Définition du critère objectif à calculer et à évaluer, en fonction du choix du type de salle et de spectacle [Kouzeleas, 2002]

Dans une première zone on définit les caractéristiques de la salle telles que son volume et son nom. Dans une deuxième zone concernant la configuration de la salle [Lamoral, 1975] on sélectionne :
- le critère objectif à calculer,
- le type de la salle (Orgue, Musique symphonique, Opéra, Jazz et chambre, Parole, Variétés),
- le type de spectacle dans la salle (Concert, Enregistrement, Parole).

Dans une troisième zone concernant l'évaluation des valeurs sur toutes les fréquences on a la possibilité de saisir des valeurs à évaluer d'un critère objectif sans que celles-ci proviennent du calcul. La saisie de ces valeurs force le système à primer les valeurs saisies par rapport aux valeurs calculées par le moteur de calcul. Ainsi le système ne tient pas compte des valeurs provenant du calcul et il se transforme d'un moteur de calcul en un moteur d'évaluation des valeurs qui sont présentées elles aussi en comparaison des valeurs optimales exactement comme dans le cas des valeurs calculées. Dans le cas contraire de « non saisie » de cette zone d'évaluation, le système continue à faire fonctionner son moteur de calcul du critère objectif souhaité.

Les valeurs, les types de salle ainsi que l'allure spectrale du critère objectif optimal pour les différents types de spectacle sont pris dans la littérature [Lamoral, 1975] et ils sont intégrés, adaptés et pris en compte dans le calcul informatique des résultats. L'adaptation de ces éléments dans le fonctionnement du calcul est expliquée ultérieurement de manière détaillée (cf. chap. 6).

Dans une quatrième zone concernant le chemin de sauvegarde des résultats on peut indiquer le chemin de sauvegarde des valeurs calculées ou des valeurs saisies en vue d'évaluation et des graphiques générés sous forme feuille Excel.

Ensuite toutes les données saisies de toutes les zones de la boîte de dialogue ainsi que les valeurs générées sont exportées de manière automatique à une feuille Excel. Cette feuille Excel se met à jour par rapport à l'objectif demandé et est présentée ultérieurement (cf. chap. 5.2.3).

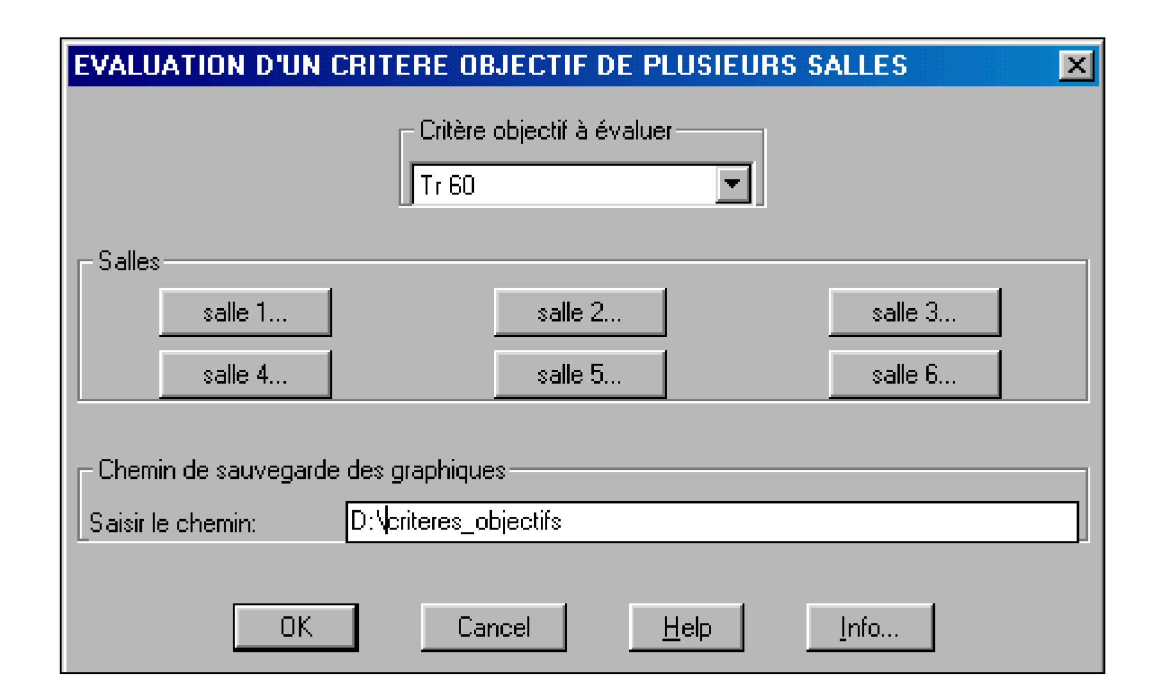
5.2.1.2 Evaluation d'un critère objectif de plusieurs salles sous une seule bande de fréquence

L'évaluation de tout critère objectif de plusieurs salles passe par la boite de dialogue principale de traduction et évaluation des résultats acoustiques (Tableau 5.2a) et le choix de la fenêtre d'accès « 1 critère obj. / plus. salles » (Tableau 5.2c).

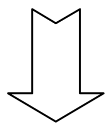
Il ne s'agit pas ici d'un calcul mais d'une évaluation du même critère objectif à travers une comparaison de ce critère de plusieurs salles à fois, sous la fréquence de 1000 Hz. En effet actuellement le calcul ne se fait que sur une seule salle modélisée dans le logiciel de

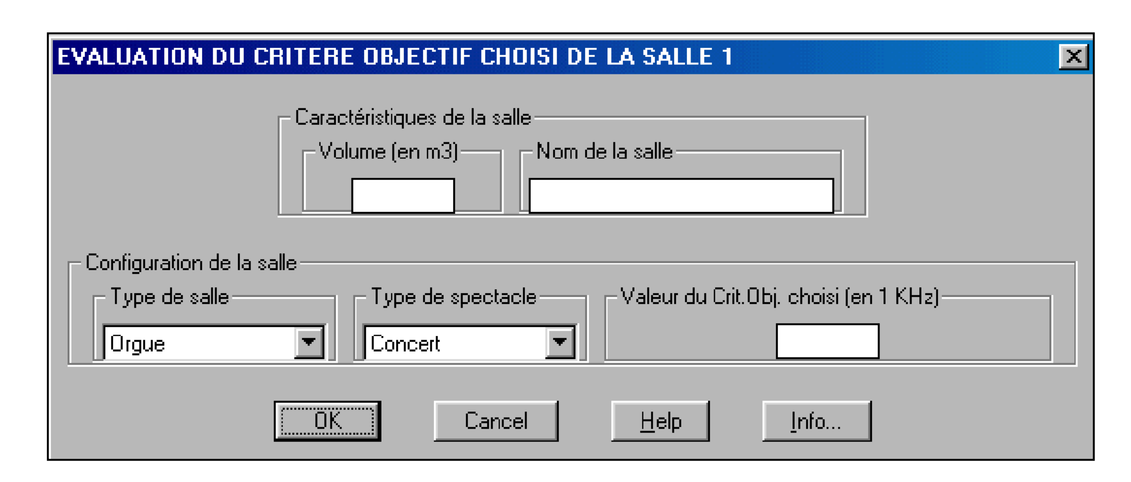
Tableau 5.4

Définition des éléments architecturaux dans l'évaluation d'un critère objectif de plusieurs salles à la fois



a. Boite de dialogue d'accès au choix de plusieurs salles de l'évaluation d'un critère objectif choisi sous une seule fréquence (1000 Hz) [Kouzeleas, 2002]





b. Boite de dialogue de saisie des caractéristiques d'une salle sélectionnée en vue d'évaluation d'un critère objectif choisi [Kouzeleas, 2002]

modélisation où l'outil en simulation acoustique architecturale s'adapte. Dans un temps à venir, la suite de cette recherche consiste à faire évoluer cet outil pour qu'il calcule simultanément cette fois-ci un critère objectif de plusieurs salles modélisées à la fois, dans le même logiciel de modélisation.

Les valeurs sont saisies par l'intermédiaire d'une boite de dialogue qui succède à la fenêtre principale d'accès à l'évaluation. A travers cette boite de dialogue, dans un premier temps on a la possibilité de choisir la salle parmi les six salles dont on va évaluer le critère objectif souhaité (Tableau 5.4a).

Dans une première zone on sélectionne le critère objectif à calculer et dans une deuxième zone un certain nombre des caractéristiques des salles une par une (de 1 à 6 salles). Après avoir fini la saisie de toutes les salles dont on va comparer et évaluer les critères objectifs, on indique dans une troisième zone le chemin de sauvegarde des résultats. Les fichiers des résultats peuvent être sauvegardés et générés dans un endroit différent à chaque fois correspondant à chacun des trois types de calcul / évaluation des valeurs des critères objectifs.

A travers la fenêtre d'accès au choix de plusieurs salles (Tableau 5.4a) on accède à la saisie des caractéristiques de chaque salle (Tableau 5.4b). Dans la boite de dialogue des caractéristiques de la salle dans une première zone on définit le volume et le nom correspondant à la salle sélectionnée. Ces données sont rapatriées automatiquement dans la feuille Excel des résultats graphiques d'évaluation du critère objectif choisi de toutes les salles.

Dans une deuxième zone concernant la configuration de la salle on définit le type de la salle (Orgue, Musique symphonique, Opéra, Jazz et Chambre, Parole, Variétés), le type de spectacle dans la salle (Concert, Enregistrement, Parole) et la valeur à évaluer du critère objectif choisi en fréquence de 1000 Hz.

Comme précédemment expliqué toutes les données saisies sont exportées automatiquement à une feuille Excel qui présente les résultats (cf. chap. 5.2.3).

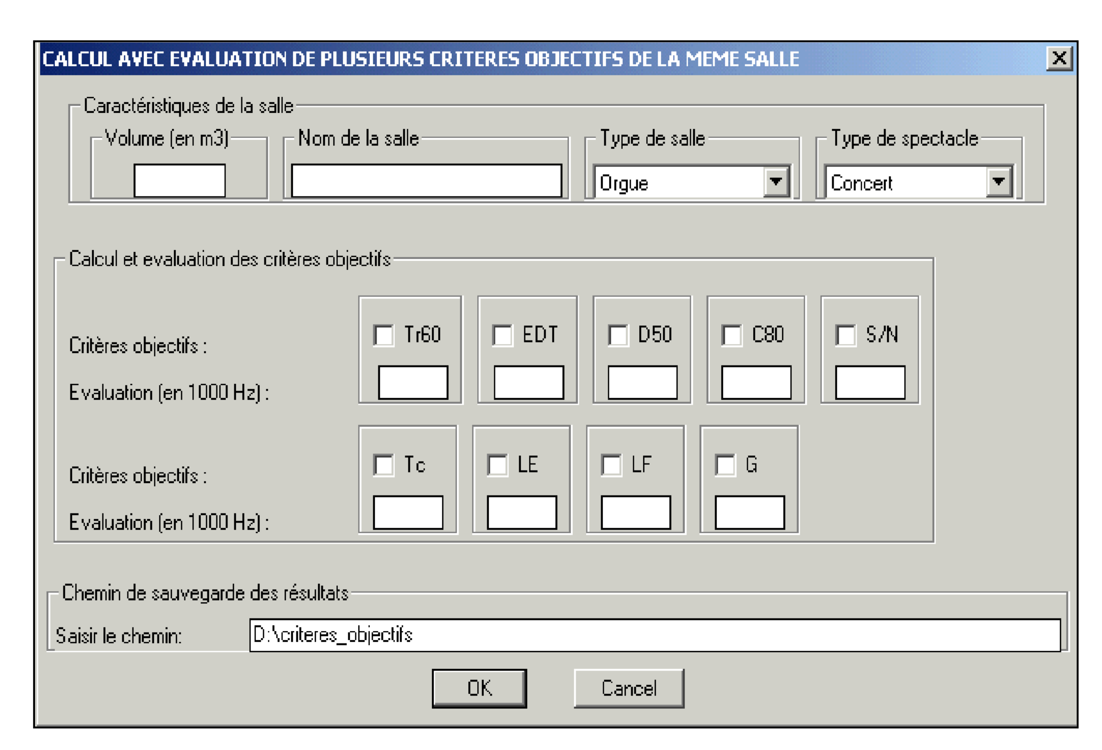
5.2.1.3 Calcul avec évaluation de plusieurs critères objectifs à la fois d'une salle sous une seule bande de fréquence

Ce troisième type de calcul avec évaluation concernant plusieurs critères objectifs de la même salle sous une seule fréquence passe aussi par la boîte de dialogue principale de traduction et évaluation des résultats acoustiques (Tableau 5.2a) et le choix de la fenêtre d'accès « Plus. crit. obj. / 1 salle » (Tableau 5.2d).

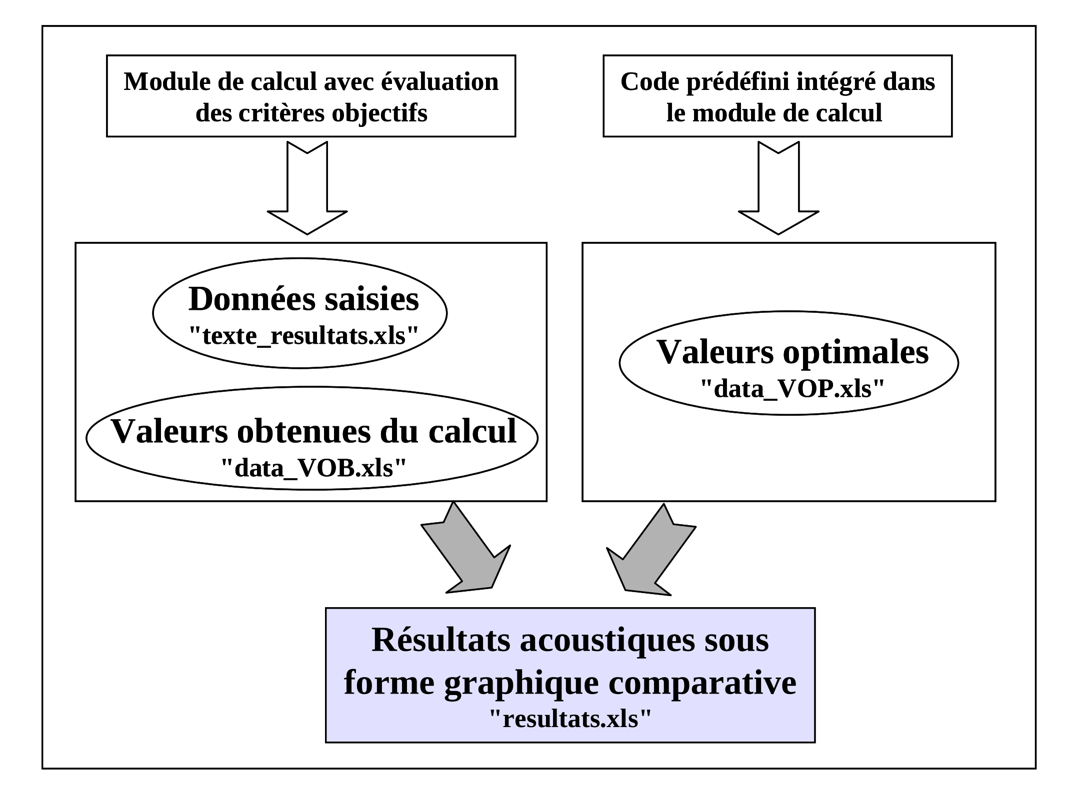
A travers la boite de dialogue de calcul avec évaluation (Tableau 5.5a) on accède dans une première zone aux caractéristiques de la salle vues précédemment à savoir le volume et le nom de la salle ainsi que le type de la salle et du spectacle. Le calcul avec évaluation peut s'effectuer sur 1 à 6 critères objectifs à la fois.

Tableau 5.5

Définition des éléments architecturaux dans le calcul avec l'évaluation de plusieurs critères objectifs d'une salle – Récupération des valeurs des critères objectifs



a. Boite de dialogue de calcul avec évaluation de plusieurs critères objectifs à la fois, d'une salle sous une fréquence [Kouzeleas, 2002]



b. Schéma de récupération des valeurs des critères objectifs [Kouzeleas, 2002]

Dans une deuxième zone alors, on peut, soit choisir les critères objectifs à calculer en cochant les cases correspondantes sans saisir des valeurs d'évaluation afin de forcer le système à calculer, soit choisir les critères en saisissant en même temps leurs valeurs correspondantes à 1000 Hz afin de forcer le système à évaluer cette fois-ci ces critères en ne tenant compte dans sa présentation des résultats que des valeurs d'évaluation saisies et non des valeurs calculées.

Enfin, comme dans tous les types de calcul présentés, on indique l'endroit de sauvegarde des résultats acoustiques qui sont générés dans une feuille Excel alimentée automatiquement par la saisie des données dans la boite de dialogue.

5.2.2 Récupération des valeurs des critères objectifs

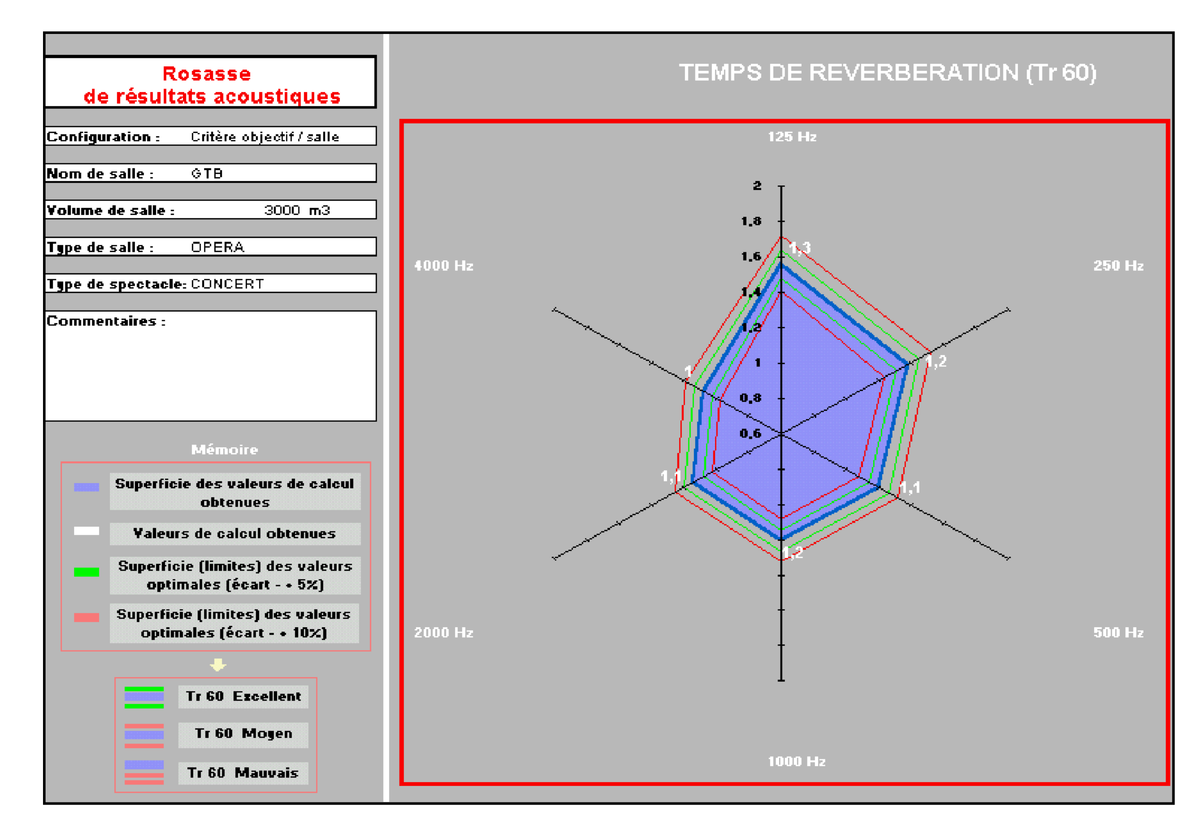
Les valeurs calculées sont enregistrées dans des fichiers Excel qui comportent des liaisons entre eux afin de traiter et afficher correctement les résultats (Tableau 5.5b) Ces fichiers dont le nom est prédéfini sont présentés ci-dessous :

- « *texte_resultats.xls* » : Dans ce fichier sont stockés toutes les données saisies dans les boites de dialogue concernant le type de calcul de critères objectifs, les caractéristiques et la configuration de la salle ainsi que le(s) critère(s) à calculer ou à évaluer. Ce fichier alimente automatiquement le fichier de présentation des résultats acoustiques.
- « *data_VOB.xls* » : Les valeurs obtenues soit par le calcul, soit par la saisie des valeurs d'évaluation.
- « *data_VOP.xls* » : Les valeurs optimales en fonction des éléments architecturaux saisis, puis,
- « *resultats.xls* » : Ce fichier doit impérativement s'ouvrir en dernier pour mettre à jour toutes les liaisons des autres données qui l'alimentent. Il présente sous forme graphique les résultats acoustiques.

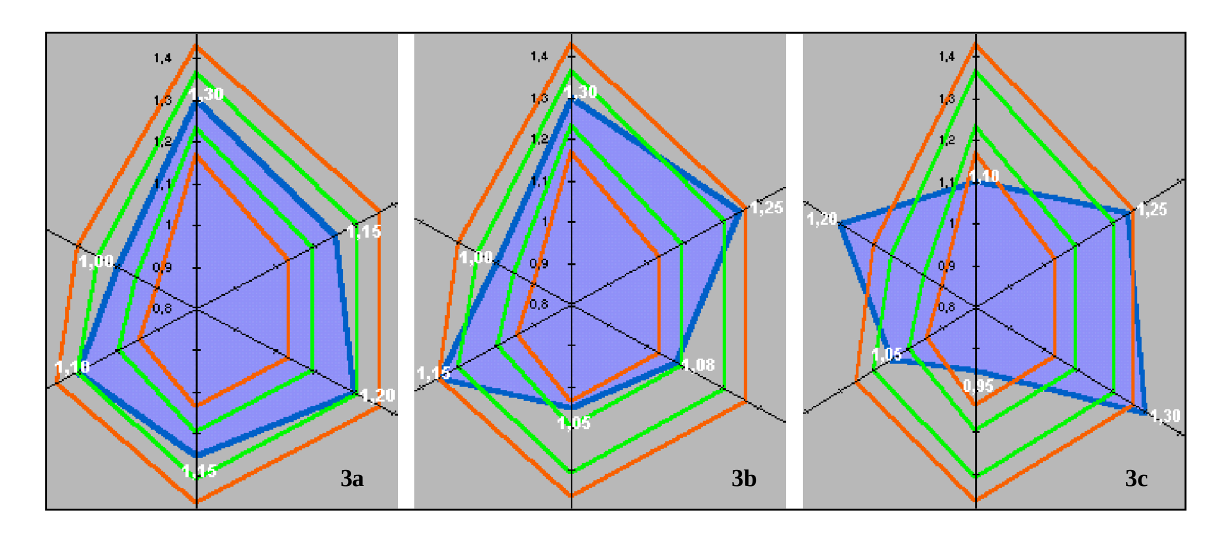
Les fichiers Excel générés par chaque calcul ou évaluation peuvent être sauvegardés à chaque fois dans un endroit indiqué différent ce qui permet la sauvegarde de tout calcul en évitant l'écrasement des fichiers des résultats acoustiques. Le fichier « *resultats.xls* » est le seul qui doit être à chaque fois copié manuellement (« copier-coller » dans l'explorateur windows) dans le même endroit indiqué aux boites de dialogues afin d'être alimenté automatiquement par les données générées par le calcul.

Tableau 5.6

Présentation des résultats acoustiques d'un critère objectif d'une salle



a. Rosace de résultats acoustiques d'un critère objectif d'une salle sous toutes les fréquences [Kouzeleas, 2002]



b. Superficie pleine formée par les valeurs calculées et située : entre les lignes vertes (deux lignes au milieu / écart + - 5 % des valeurs optimales – ex : Tr) : Crit.obj. excellent (3a), entre les lignes rouges (ligne intérieure et extérieure / écart + - 10 % des valeurs optimales – ex : Tr) : Crit.obj. moyen (3b), en dehors des lignes rouges : Crit.obj. mauvais (3c) [Kouzeleas, 2002]

5.2.3 Présentation des valeurs des critères objectifs

5.2.3.1 Présentation d'un critère objectif d'une salle sous toutes les bandes de fréquence

Le fichier Excel « resultats.xls » comporte dans une première feuille nommée « Résultats graphiques » les résultats acoustiques (valeurs obtenues) en les comparant avec les valeurs optimales (Tableau 5.6a).

Dans la partie droite des résultats les valeurs obtenues par le calcul forment une superficie (ici remplie par la couleur bleue) au centre du diagramme où les six axes, correspondant chacun à une fréquence, se croisent. Cette superficie pleine est d'abord comparé avec les limites de la première superficie vide (les deux lignes vertes au milieu de quatre lignes) qui correspond aux valeurs proche aux optimales (écart : - + 5 %), (ex : calcul de Tr). Quand cette superficie pleine se situe entre les lignes vertes la valeur du critère objectif est excellent (Tableau 5.6b-gauche), quand elle se situe entre les lignes rouges (écart : - + 10 %) le crit.obj. est moyen (Tableau 5.6b-milieu), tandis que quand elle est en dehors des dernières limites des lignes rouges soit vers l'intérieur soit vers l'extérieur, le crit.obj. est mauvais (Tableau 5.6b-droite). Il faut souligner qu'en fonction du calcul de critère objectif cet écart diffère et qu'il s'adapte à l'échelle des valeurs optimales récuperées de la littérature (Tableau 7.11, 7.12).

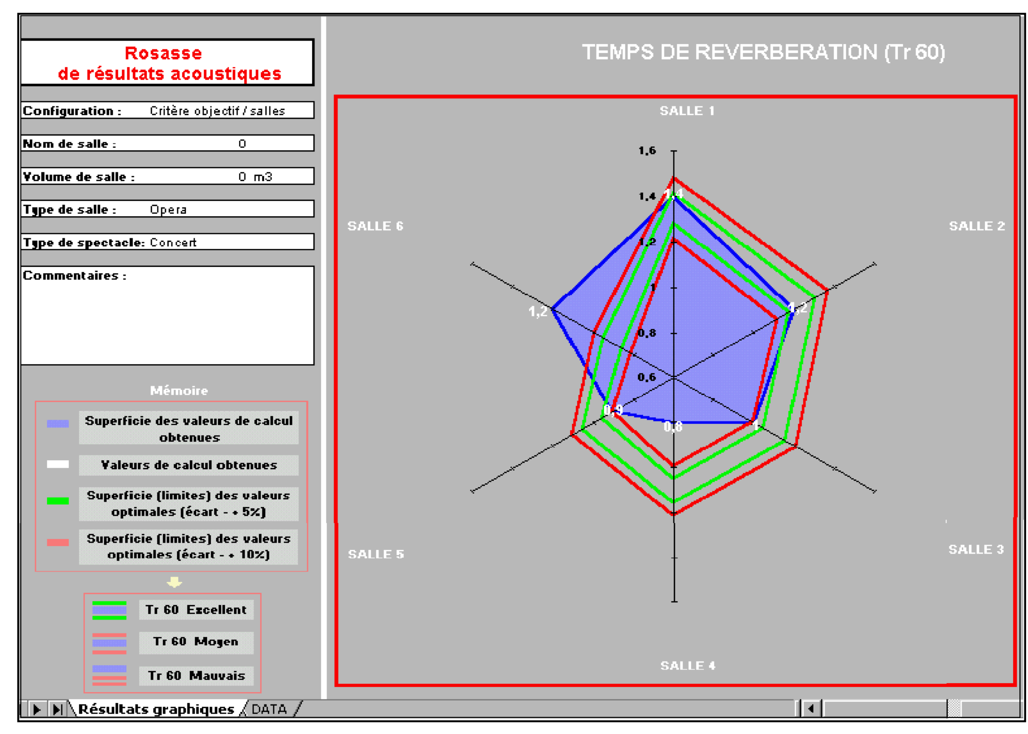
Dans la partie gauche de la même feuille Excel des résultats, le graphique rapatrie automatiquement toutes les données propres à la salle et au type du calcul, saisies dans les boites de dialogue précédemment à savoir le type de calcul, le nom, le volume et le type de la salle ainsi que le type de spectacle. Une petite zone reste pour les commentaires sur les résultats et un tableau d'explication situe et évalue le critère objectif par rapport à la comparaison des valeurs obtenues et optimales.

Le même fichier Excel « resultats.xls » dans une deuxième feuille nommée « Data » comporte toutes les valeurs obtenues, optimales ainsi qu'une autre forme de présentation « traditionnelle » de mêmes résultats à l'aide des courbes graphiques (Tableau 5.7b)

Dans cette feuille « Data », les valeurs obtenues ainsi que toutes les valeurs optimales sont alimentées de manière automatique par les autres fichiers Excel qui sont générés par l'interface qui lie le logiciel de modélisation avec le moteur de calcul acoustique intégré (interne) ou adapté (externe). La comparaison de manière graphique se fait seulement entre les valeurs obtenues par le calcul et les valeurs optimales absolues sans écart pour qu'elle soit plus claire et visible (Tableau 5.7b).

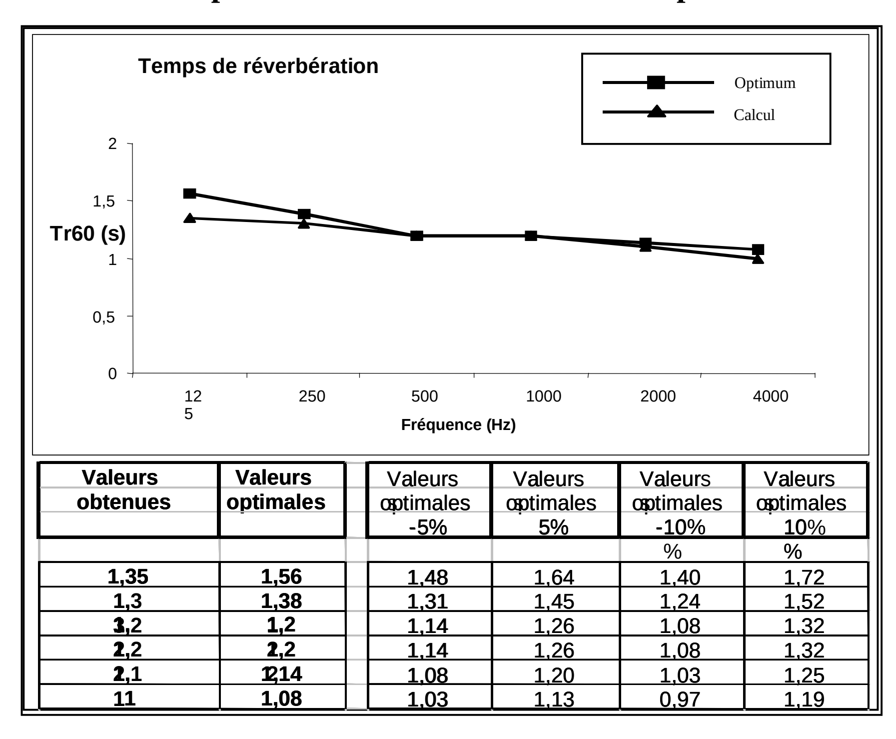
Tableau 5.7

Présentation des résultats acoustiques d'un critère objectif de plusieurs salles



a. Rosace de résultats acoustiques d'un critère objectif de plusieurs salles sous une fréquence (1000 Hz) [Kouzeleas, 2002]

Présentation parallèle des résultats acoustiques sous forme "traditionnelle" de comparaison des valeurs obtenues et optimales



Valeurs obtenues	Valeurs optimales	Valeurs optimales -5%	Valeurs optimales 5%	Valeurs optimales -10%	Valeurs optimales 10%
1,35	1,56	1,48	1,64	1,40	1,72
1,3	1,38	1,31	1,45	1,24	1,52
1,2	1,2	1,14	1,26	1,08	1,32
1,2	1,2	1,14	1,26	1,08	1,32
1,1	1,14	1,08	1,20	1,03	1,25
11	1,08	1,03	1,13	0,97	1,19

b. Comparaison sous forme « traditionnelle » des valeurs obtenues et optimales d'un critère objectif d'une salle. Toutes les valeurs sont alimentées automatiquement par le moteur de calcul acoustique [Kouzeleas, 2002]

5.2.3.2 Présentation d'un critère objectif de plusieurs salles sous une bande de fréquence

Comme dans la présentation précédente le fichier Excel « *resultats.xls* » comporte dans sa feuille nommée « *résultats graphiques* » l'évaluation d'un critère objectif de plusieurs salles à la fois (de 1 à 6) en 1000 Hz (Tableau 5.7a).

Cette présentation est presque identique à celle d'un critère objectif d'une seule salle sauf qu'ici les différentes fréquences sont remplacées par les salles. Chaque axe correspond à une salle dont la valeur du critère objectif à évaluer est saisie en 1000 Hz. Toutes les données sont rapatriées automatiquement lors de la saisie dans les boites de dialogue. Dans la deuxième feuille Excel « *Data* » les valeurs obtenues de chaque salle sont présentées en comparaison avec les valeurs optimales sous forme de courbe graphique.

5.2.3.3 Présentation de plusieurs critères objectifs à la fois d'une salle sous une bande de fréquence

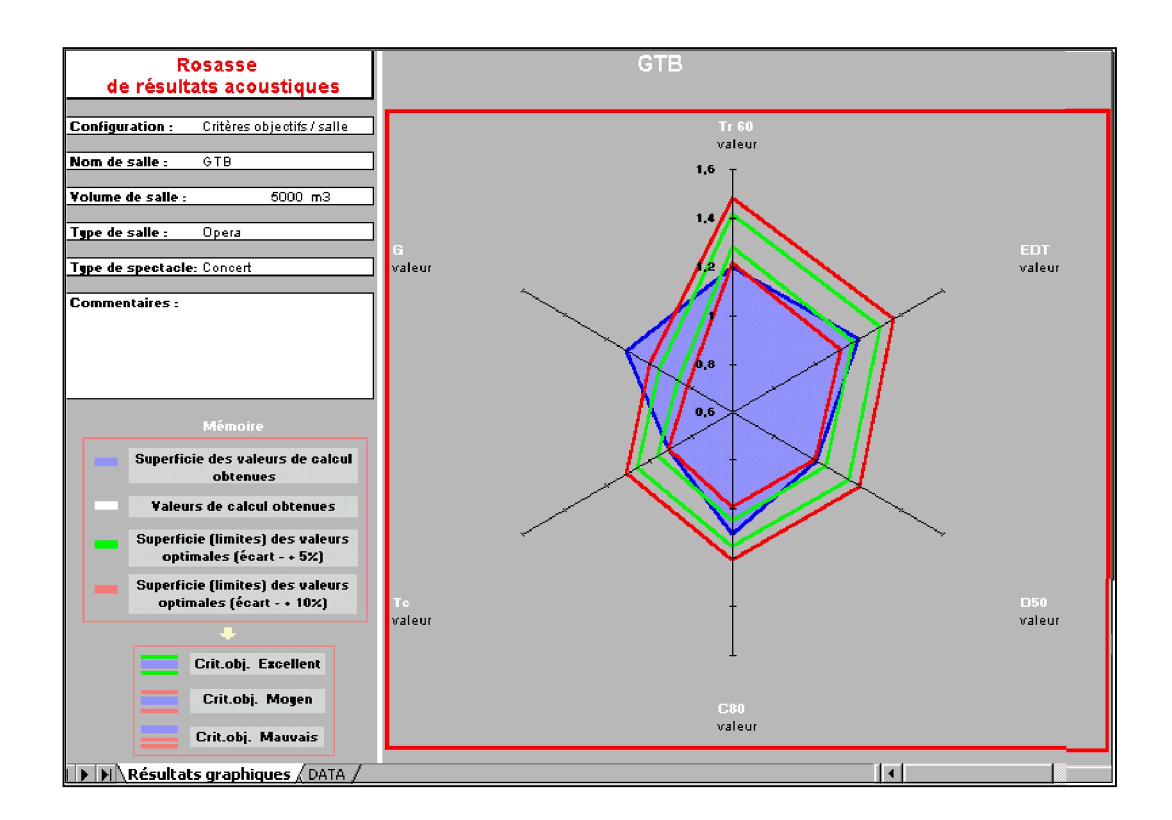
De manière identique aux précédentes présentations le fichier « resultats.xls » comporte les résultats acoustiques du calcul ou de l'évaluation de plusieurs critères objectifs à la fois de la même salle en fréquence de 1000 Hz dans le même graphique (Tableau 5.8a).

Dans cette présentation chaque axe correspond à un critère objectif différent sélectionné précédemment dans les boites de dialogue. Il est évident que les valeurs de chaque critère correspondent à une échelle différente (par exemple l'échelle du D50 - du 0% au 100% - est différente de celle du C80, etc...). Pour cette raison l'échelle sur laquelle est tracée la superficie pleine représentant les valeurs obtenues, est homogénéisée. Cela veut dire que toutes les échelles de tout critère objectif ont été reportées – calées sur une échelle unique ce qui facilite la présentation et surtout l'évaluation des résultats (cf. chap. 5.8). Les valeurs obtenues par le calcul correspondant à chaque critère s'affichent aussi en chiffres absolus dans le même graphique.

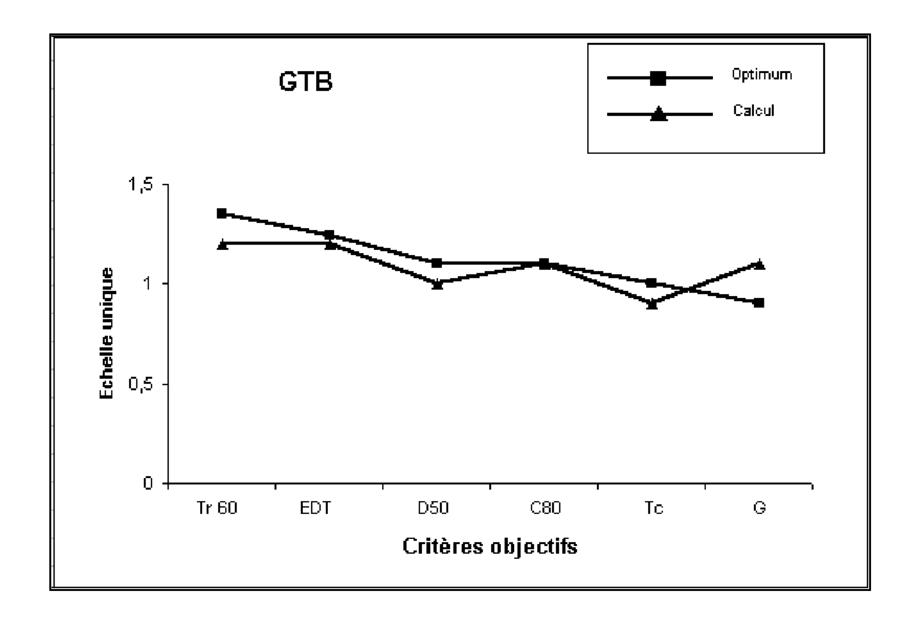
Dans la deuxième feuille Excel « Data » les valeurs reportées à une échelle unique de chaque critère choisi cette fois-ci sont présentées en comparaison avec les valeurs optimales sous forme de courbe graphique. Ce type de graphique ne présente pas les valeurs obtenues absolues du calcul mais il permet d'évaluer et comparer ces valeurs avec les valeurs optimales calées elles aussi à la même échelle (Tableau 5.8b).

Tableau 5.8

Présentation des résultats acoustiques de plusieurs critères objectifs d'une salle



a. Rosace de résultats acoustiques de plusieurs critères objectifs à la fois de la même salle sous une fréquence (1000 Hz) [Kouzeleas, 2002]



b. Comparaison sous forme courbe graphique des valeurs obtenues et optimales, reportées à une échelle unique, des plusieurs critères objectifs, d'une salle sous une seule fréquence (1000 Hz) [Kouzeleas, 2002]

5.3 Conclusions

La traduction architecturale des résultats acoustiques se réalise à travers leur évaluation et comparaison avec des valeurs optimales prise de la littérature. Cette évaluation synonyme de traduction se fait en relation avec des éléments architecturaux divers qui décrivent autant la conception architecturale que leur influence sur la qualité acoustique. Ainsi les résultats acoustiques sont plus « parlants » pour des architectes qui peuvent de cette façon les apprécier et les évaluer.

L'illustration des valeurs acoustiques sous forme de « rosaces acoustiques » permet de mieux visualiser les diverses comparaisons possibles entre critères objectifs, salles et fréquences.

Cette traduction architecturale des résultats acoustiques sert comme une base de dialogue commune, afin que la communication entre architecte et acousticien soit plus compréhensible et efficace. Bien évidemment cette traduction ne peut dans aucun cas remplacer l'expert acoustique dont les conseils et la maîtrise des divers paramètres acoustiques sont absolument nécessaires et souvent indispensables. C'est pour cela que son utilisation doit se faire de manière judicieuse et réfléchie.

Néanmoins l'aide de cette traduction pendant la phase de la conception architecturale peut être très précieuse et rendre le résultat architectural et acoustique plus « exploitable » et plus proche des valeurs acoustiques « idéales ».

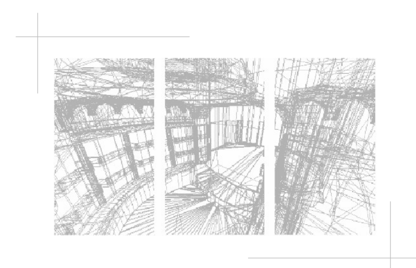
Chapitre 6

Plate-forme d'aide en simulation acoustique



6. Plate-forme d'aide en simulation acoustique

6.1 Introduction
6.2 Présentation des composantes de la plate-forme d'aide en simulation acoustique
6.2.1 Présentation de la composante « Pédagogie »
6.2.1.1 Base de données
6.2.1.1 Approche géométrique
6.2.1.3 Approche statistique
6.2.1.4 Analyse détaillée
6.2.2 Présentation de la composante « Modélisation »
6.2.2.2 Processus de modélisation
6.2.2.3 Simplification de modèles
6.2.3 Présentation de la composante « Traduction et évaluation »
6.2.4 Présentation de la composante « Calcul »
6.2.4.2 Etude géométrique
6.2.4.3 Calcul de critères objectifs
6.3 Perspectives



6.1 Introduction

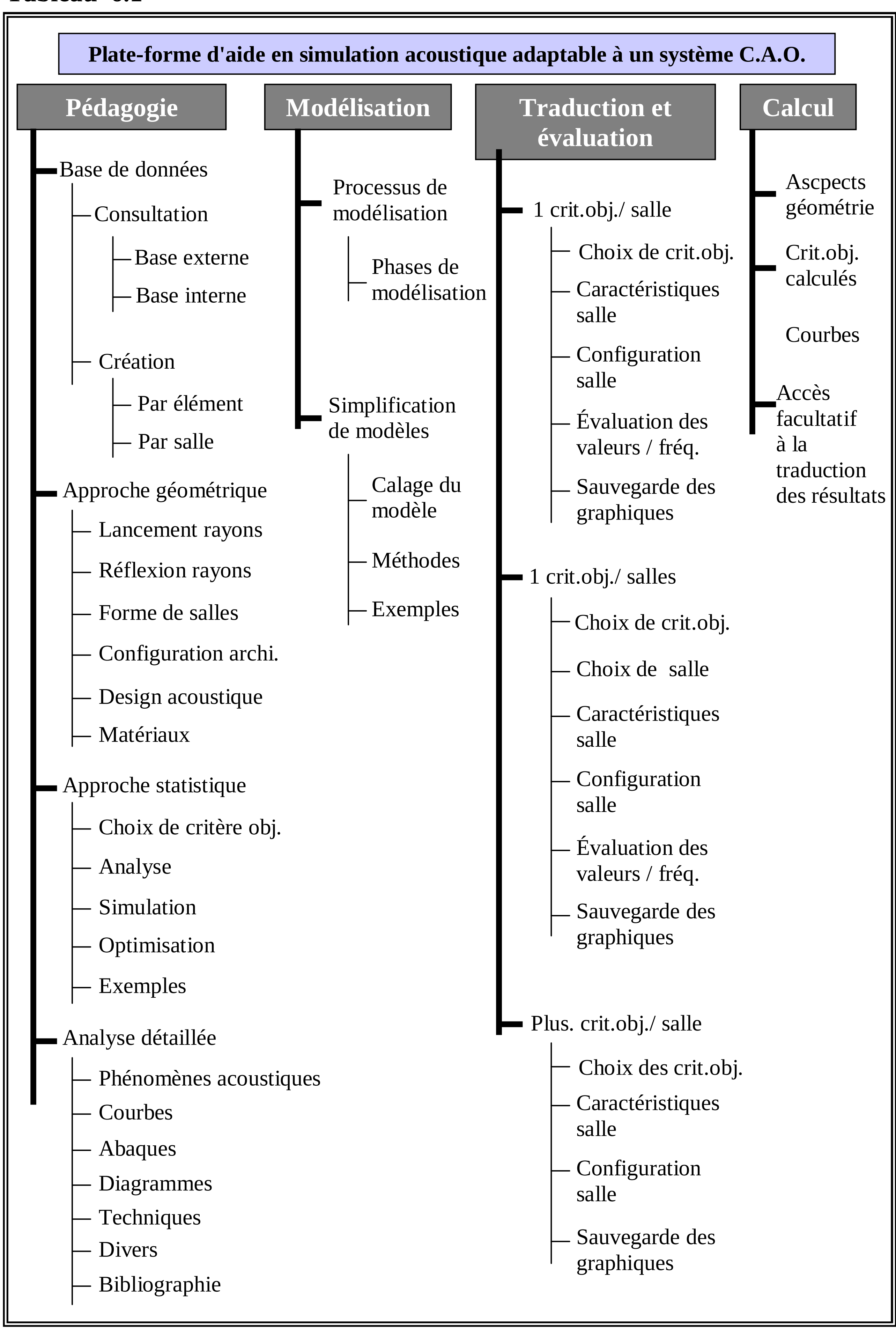
L’outil d’aide en simulation acoustique architecturale adaptable à un système C.A.O., proposé dans cette étude, est l’issue et le rassemblement de toutes les recherches de cette thèse. Cette plate-forme intègre tous les processus de recherche développés en les automatisant à travers une ergonomie souple. En effet chaque phase de processus et chaque recherche donne lieu à un développement spécifique de routine de programmation [AutoCAD, 2000], [Immler, 1993], [Omura, 1990], [Kramer, 1997]. Tous ces programmes informatiques développés sous langage Visual-LISP et Visual-BASIC sous AutoCAD (logiciel de C.A.O.) sont intégrés dans cette plate-forme de manière transparente en exécutant un certain nombre d’opé²rations de modélisation, simulation et de calcul architectural et acoustique. La plate-forme proposée n’est pas seulement un outil d’intégration des recherches sur la modélisation architecturale et la simulation acoustique mais une interface d’intégration des données acoustiques diverses telles que la consultation et la création d’une base de données acoustiques (cf. chap. 6.2.1.1) et un outil de récupération ou de génération des résultats acoustiques et d’intégration d’autres moteurs de calcul acoustique.

L’importance d’une telle plate-forme ne se trouve pas dans son développement malgré sa complexité et elle ne constitue probablement pas un véritable objet de recherche à évaluer en tant que tel. Son importance est due d’abord au fait qu’elle peut englober, en nombre, des recherches diverses, les rendre opérationnelles et automatisées pendant la phase même de la conception architecturale. Ensuite elle est due à son adaptabilité à un système C.A.O. intégrant en même temps tous les outils de modélisation architecturale moderne avec les outils de calcul et de simulation acoustique. Cette intégration se régularise à l’aide de tous les processus et études ici développés et elle s’effectue à travers une véritable interface adaptable technique et graphique.

L’importance de la modélisation architecturale dans la simulation acoustique démontrée précédemment, rend indispensable la création d’un outil qui rassemble ces deux mondes dépendants. La finalité d’une telle plate-forme est de lier les phases de modélisation architecturale et simulation acoustique afin de construire un outil d’aide et d’évaluation des propositions pendant la phase de la conception architecturale. Cela devient presque une nécessité particulièrement pour les architectes en tant que concepteurs des espaces acoustiques. Le « va et vient » d’une application C.A.O. à une application de simulation acoustique est un processus très long et difficile à gérer qui concerne souvent une vérification ou une correction acoustique et non une **conception acoustique**.

Accepter la nécessité des définitions des processus d'adaptation des outils de modélisation géométrique des salles à la démarche acoustique, et la nécessité de rapprochement de ces démarches différentes, c'est rendre opérationnelles ces processus en les automatisant dans la même interface ajustée dans un outil de modélisation architecturale utilisé par des architectes pour faciliter leur travail. Les démarches développées, adaptées et automatisées dans la plate-forme proposée, sont nées à partir d'une identification des " vides " de communication entre architectes et aménagement acoustique et des besoins des architectes à concevoir des salles en les modélisant de manière adaptée et adéquate par rapport à la démarche acoustique et en les évaluant sans forcement être des acousticiens à travers des

Tableau 6.1


Plate-forme d'aide en simulation acoustique adaptable à un système C.A.O.
Pédagogie
Base de données
Consultation
Base externe
Base interne
Création
Par élément
Par salle
Approche géométrique
Lancement rayons
Réflexion rayons
Forme de salles
Configuration archi.
Design acoustique
Matériaux
Approche statistique
Choix de critère obj.
Analyse
Simulation
Optimisation
Exemples
Analyse détaillée
Phénomènes acoustiques
Courbes
Abaques
Diagrammes
Techniques
Divers
Bibliographie
Modélisation
Processus de modélisation
Phases de modélisation
Simplification de modèles
Calage du modèle
Méthodes
Exemples
Traduction et évaluation
1 crit.obj./ salle
Choix de crit.obj.
Caractéristiques salle
Configuration salle
Évaluation des valeurs / fréq.
Sauvegarde des graphiques
1 crit.obj./ salles
Choix de crit.obj.
Choix de salle
Caractéristiques salle
Configuration salle
Évaluation des valeurs / fréq.
Sauvegarde des graphiques
Plus. crit.obj./ salle
Choix des crit.obj.
Caractéristiques salle
Configuration salle
Sauvegarde des graphiques
Calcul
Ascpects géométrie
Crit.obj. calculés
Courbes
Accès facultatif à la traduction des résultats

outils d'évaluation et de traduction architecturale des résultats acoustiques. L'important dans une telle plate-forme d'aide en simulation acoustique pour les architectes, c'est l'intégration et la co-existence de tout processus répondant à la communication et au rapprochement du monde de l'acoustique avec celui de l'architecture.

Cette plate-forme est constituée de quatre grandes composantes (Tableau 6.1). La première composante concerne « la pédagogie ». La plate-forme devient un outil de pédagogie, de consultation et de création des bases de données externes et internes. Une approche géométrique et statistique démontrée du fonctionnement de l'acoustique, basée sur des simulations, optimisations, analyses des phénomènes acoustiques et des exemples, complètent cette partie de l'outil (cf. chap. 6.2.1).

La deuxième composante concerne la modélisation architecturale. Dans cette partie sont automatisés tous les processus de modélisation et de simplification des modèles en vue de simulation acoustique (cf. chap. 6.2.2).

La troisième composante concerne la « traduction et évaluation » des résultats acoustiques à travers les trois types de calcul, avec évaluation des critères objectifs présentés précédemment (cf. chap. 5).

La quatrième composante concerne le calcul acoustique. Cette partie comporte une étude géométrique de calcul et de visualisation du comportement géométrique de l'acoustique et le calcul pur des critères objectifs du moteur de calcul acoustique intégré (interne) ou adapté (externe) (cf. chap. 6.2.4).

6.2 Présentation des composantes de la plate-forme d'aide en simulation acoustique

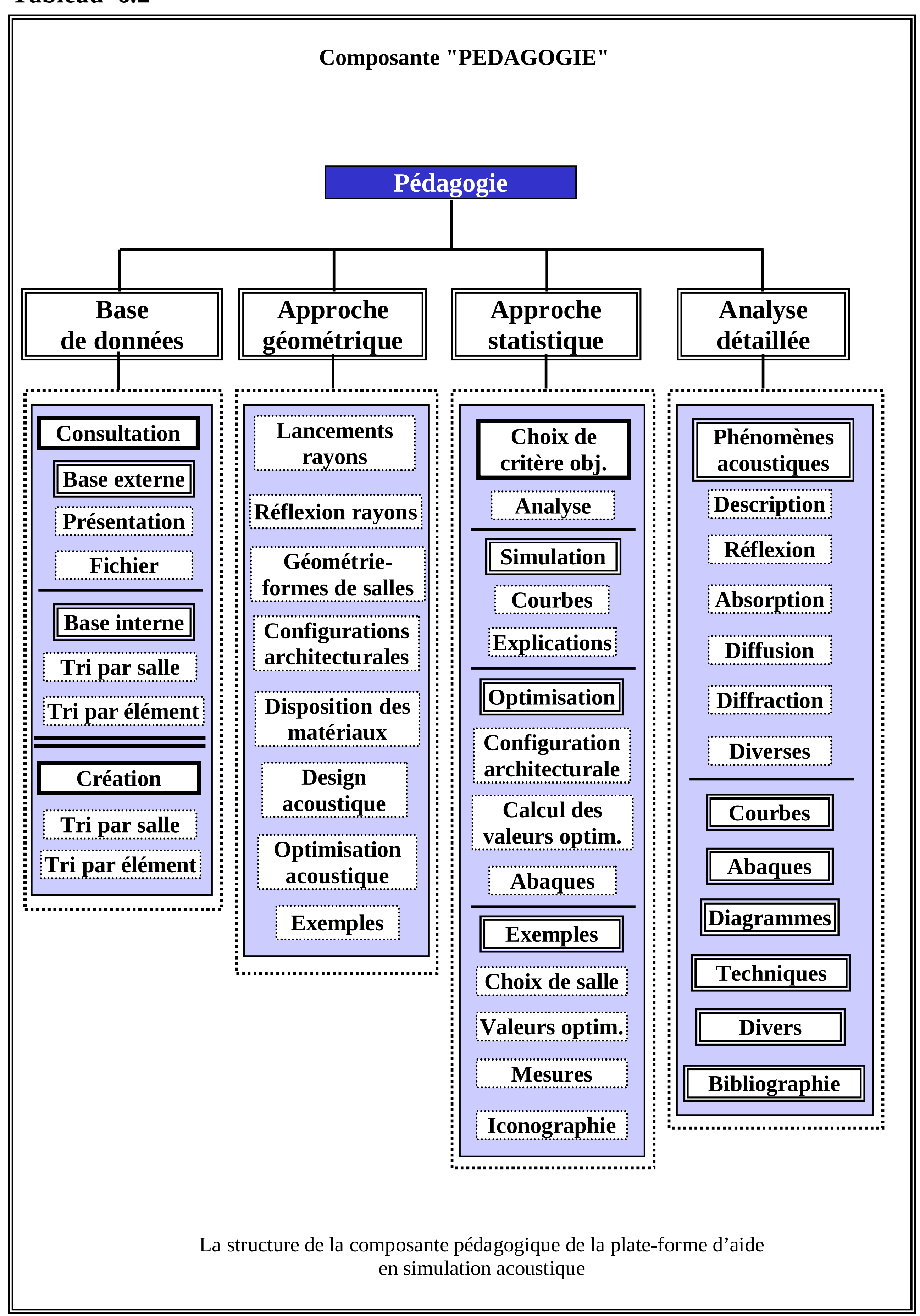
6.2.1 Présentation de la composante « Pédagogie »

Dans cette partie tous les éléments et les résultats présentés s'adaptent à une finalité pédagogique plutôt qu'à une finalité de calcul. Cet outil pédagogique est destiné à la fois d'un coté à une population qui ne dispose d'aucune connaissance acoustique en utilisant cet outil comme moyen de formation et de l'autre coté à une population familiarisée avec l'acoustique en utilisant l'outil entre autre en tant que base de consultation et de création des données diverses (acoustiques, techniques, bibliographiques, etc…).

A l'aide d'une interface technique et graphique ergonomiquement conçue sous forme des boites de dialogue interactives, on a la possibilité d'accéder :

- à une base de données d'éléments architecturaux tels que des salles-modèles, dessins, photos, diagrammes et explications,
- au module de l'approche géométrique qui concerne l'apprentissage par présentation des résultats géométriques tels que le lancement des rayons, les réflexions, le comportement sonore graphiquement présenter en 3D, les types de spectacle et des géométries-formes, la comparaison des résultats obtenus avec les résultats « optimaux »,

Tableau 6.2



La structure de la composante pédagogique de la plate-forme d'aide en simulation acoustique

- au module de l'approche statistique qui concerne l'apprentissage par présentation des résultats statistiques tels que les critères objectifs et des diagrammes,
- à l'analyse détaillée des diagrammes et des courbes graphiques théoriques illustrant des divers phénomènes acoustiques et
- à des exemples de modèles.

Le Tableau 6.2. illustre la structure de cette composante pédagogique de la plate-forme d'aide en simulation acoustique.

6.2.1.1 Base de données

L'objectif pédagogique de cette base de données est évident. Une telle base de données disponible à tout moment pendant la phase de conception architecturale est un outil précieux d'aide à la décision. L'enrichissement et la mise à jour continue de cette base avec des présentations et des explications sur des problématiques acoustiques rencontrées lors de la conception acoustique peut faire réfléchir, apprendre et éviter la répétition des erreurs. A travers une consultation ou une création des éléments acoustiques de salles tels qu'une iconographie, des modèles architecturaux, des descriptifs, des mesures, etc..., on accède à une base de données interne ou bien à des présentations faites par d'autres applications ou à des fichiers externes (Tableau 6.3a)

Consultation

La consultation de la base de données consiste à accéder à travers une boite de dialogue à une base « acoustique » externe en appelant des applications externes de présentation des éléments acoustiques et à une base interne des éléments acoustiques par tri d'un élément désigné ou par salle.

Base externe

A travers des boite de dialogue (Tableau 6.3b) on a la possibilité d'une part d'appeler n'importe quelle présentation acoustique faite en hypertexte (html) et de la visualiser à l'aide d'une application externe adéquate (ex : « Internet Explorer » ou « Netscape ») qui se lance automatiquement et d'autre part d'accéder à tout élément indépendant acoustique présenté sous forme texte (application Word), feuille Excel, image tout format et son (format .wav).

Base interne

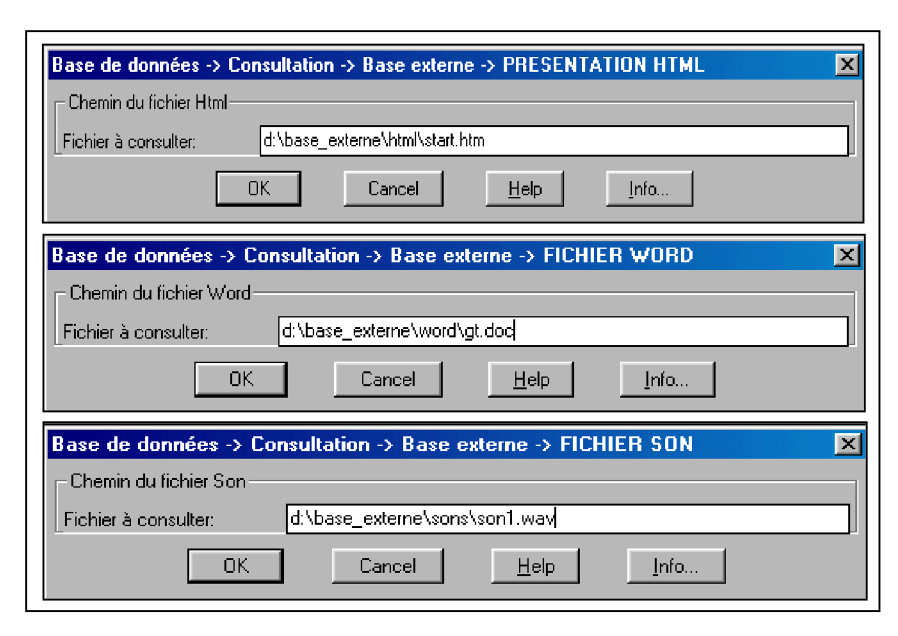
La consultation de la base de données interne consiste à accéder soit par un tri de salle soit indépendamment à des éléments acoustiques tels que des descriptifs et explications, des photos, des modèles architecturaux, des dessins, des mesures, des simulations acoustiques diverses et des analyses acoustiques (Tableau 6.4a).

Tableau 6.3

Base de données

CAD-Acoustic
Pédagogie | Modélisation | Traduction et évaluation | Calcul
Base de donées | Approche géometrique | Approche statistique | Analyse détaillée
Consultation
Base externe
Présentation: Html, Powerpoint
Fichier: Word, Excel, Image, Son
Base interne
Par élément / salle: Salles, Descriptif, Iconographie, Modèles archi., Simulation, Mesures, Analyse
Création
Par élément / salle: Salles, Descriptif, Iconographie, Modèles archi., Simulation, Mesures, Analyse

a. Boite de dialogue présentant l'accès à la base de données de la composante « pédagogie » de la plate-forme d'aide en simulation acoustique nommé « CAD-Acoustic »



b. Exemples des boites de dialogue de consultation des présentations et des fichiers externes (Consultation de la base externe – Base de données)

L'accès aux données par tri de salle s'effectue à travers la boîte de défilement des salles. Les éléments acoustiques à consulter d'une salle se constituent [Semidor, 1999] :

- d'un descriptif détaillé sur les éléments architecturaux utilisés, la configuration acoustique, les mesures architecturales, etc...,
- des photos des configurations diverses, des détails architecturaux et acoustiques,
- des coupes, des plans architecturaux ainsi que tout autre dessin de la salle,
- des vues du modèle architectural numériquement simulé en mode image de synthèse, filaire ou bien en animation,
- et enfin des résultats des mesures sur des critères objectifs et des enquêtes effectuées sur la perception humaine de l'adaptation adéquate de la salle, ou bien des phénomènes physiques ou acoustiques comme la réverbération, etc… (Tableau 6.4b).

L'accès aux données par tri d'élément peut s'effectuer également de manière plus focalisée en filtrant toutes les salles à travers la désignation de l'élément particulier acoustique (fig. 17).

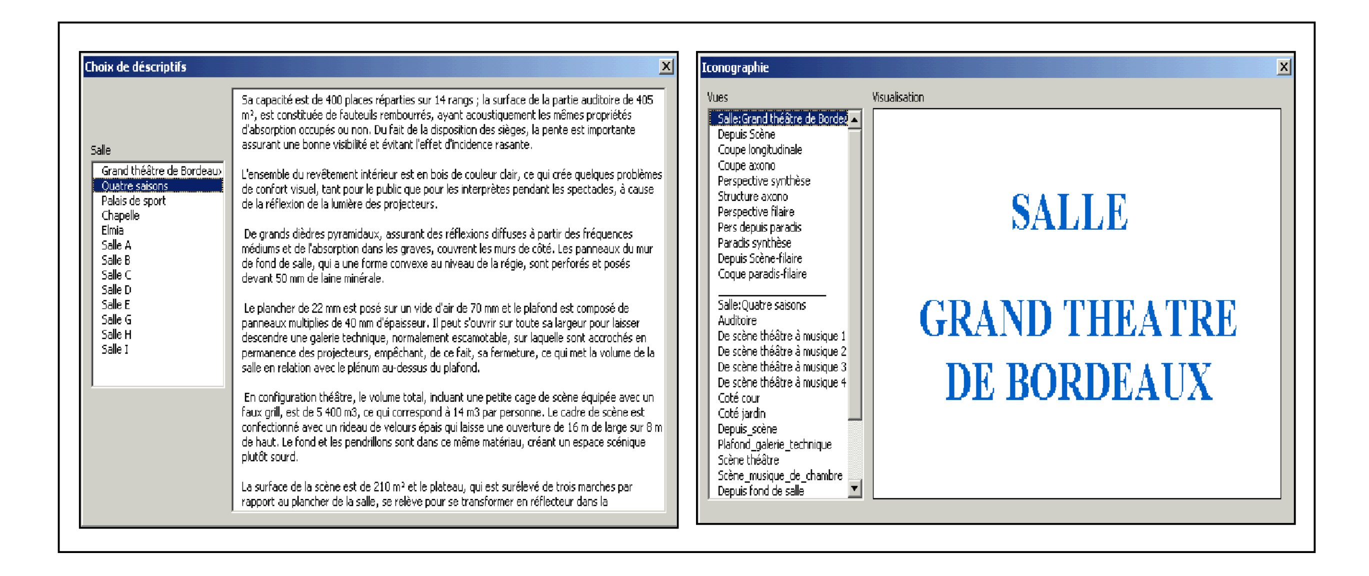


Fig. 17 - Données filtrées par élément particulier – ici : liste de descriptifs et iconographie de toutes les salles)

Création

La création et la modification de la base de données s'effectue à travers le même principe et structure de la consultation de la base de données interne. Les éléments acoustiques existants d'une salle, accédés par tri d'un élément désigné ou par salle peuvent être modifiés ou supprimés (modification) ou bien alimentés (création). La création peut

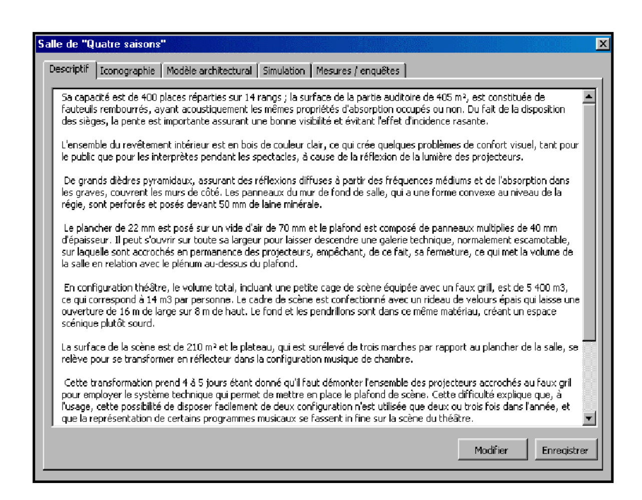
Tableau 6.4

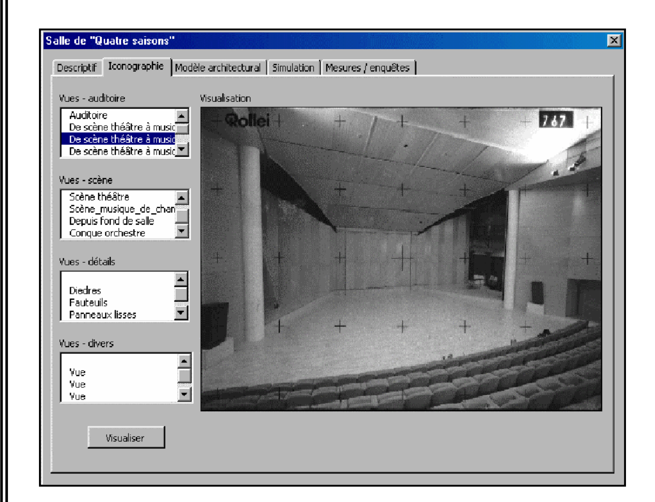
Consultation des éléments acoustiques de la base de données interne par choix de salle

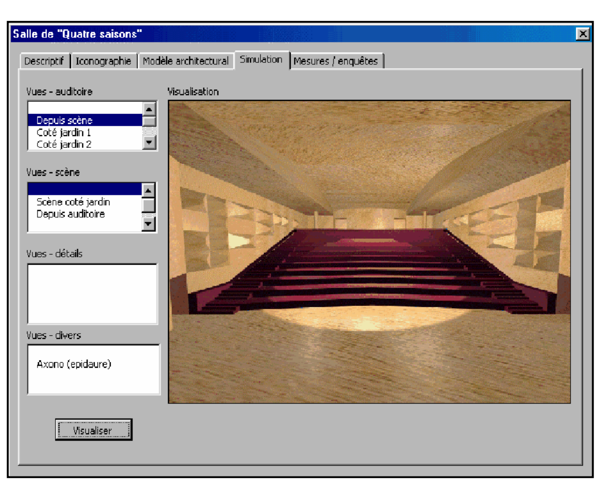


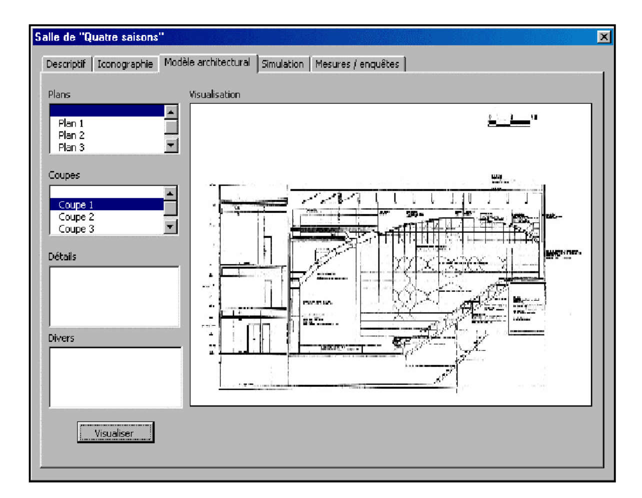


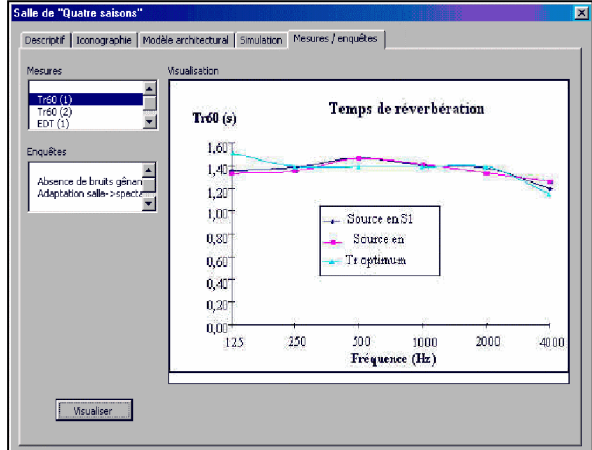
a. Accès à la base interne par choix de salle











b. Les éléments acoustiques à consulter d'une salle dans la base de données interne

s'appliquer également sur de nouvelles salles. Le module intégré de « contrôle » permet le choix des options : « créer – modifier – supprimer » (fig. 18).



Fig.18 - Accès à la création et modification de la base de données par choix de salle

6.2.1.2 Approche géométrique

Dans cette partie sont détaillés le fonctionnement géométrique de l'acoustique à travers de visualisation des rayons, des types de géométrie de salles, des configurations architecturales, d'optimisation du design acoustique avec la disposition adéquate des matériaux et d'analyse visuelle des exemples (Tableau 6.5a).

Tirs des rayons

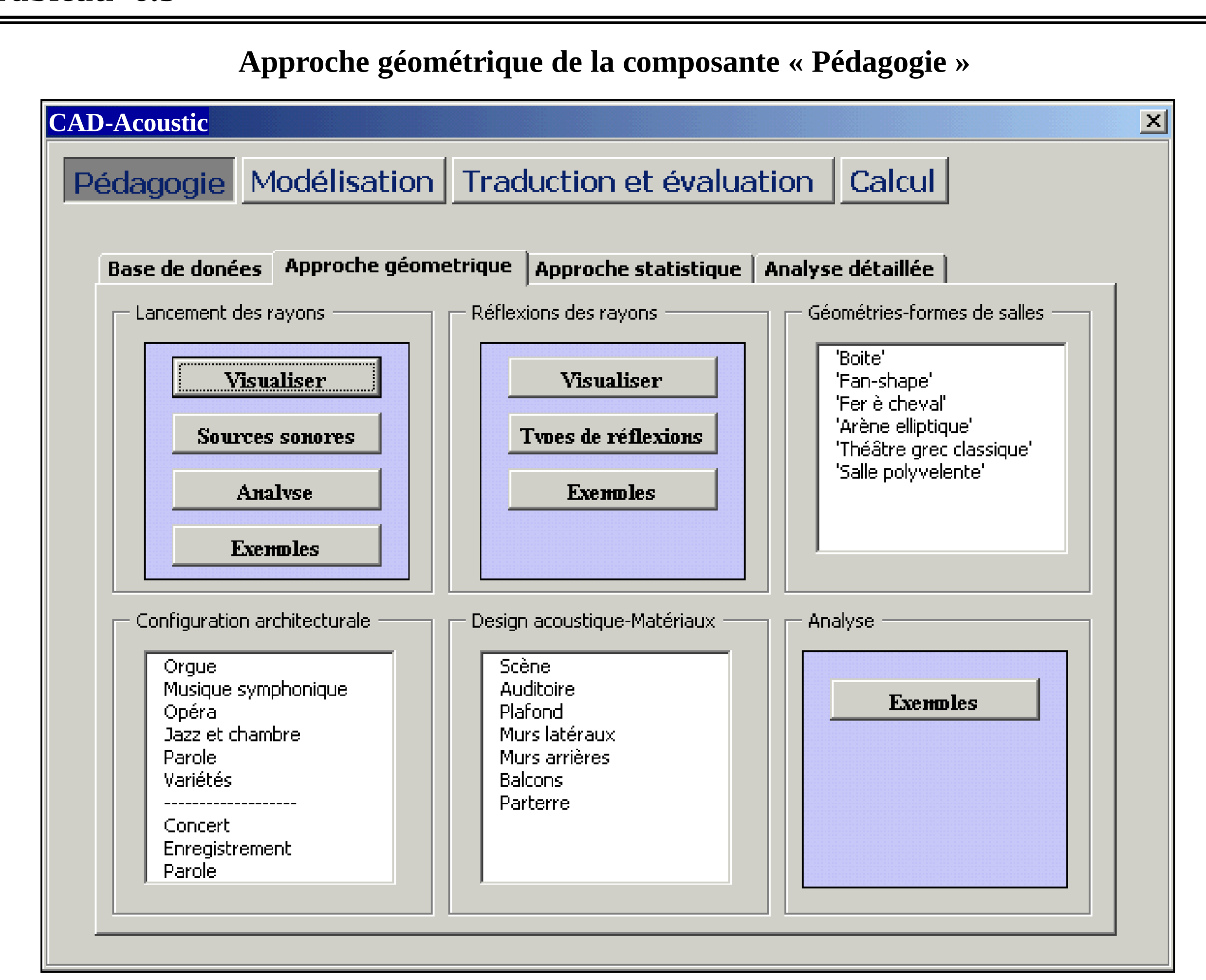
Cette partie se réfère à une bibliographie existante en essayant de récupérer un certain nombre d'éléments autour de l'émission sonore. Elle consiste d'abord à démontrer le comportement de lancement des rayons acoustiques en fonction des types de sources sonores de manière visuelle. Elle présente et analyse les différents types de sources sonores instrumentales, humaines et autres. Ensuite des exemples visualisent et analysent les directivités des sources sonores modélisées en 3D, permettant de mieux comprendre le rôle des certains éléments architecturaux (ex : plancher de scène, etc...) dans la propagation du son pour différentes fréquences (Tableau 6.5b). Comme toute partie, elle est évolutive à l'aide du module de contrôle « créer – modifier – supprimer ».

Réflexion des rayons

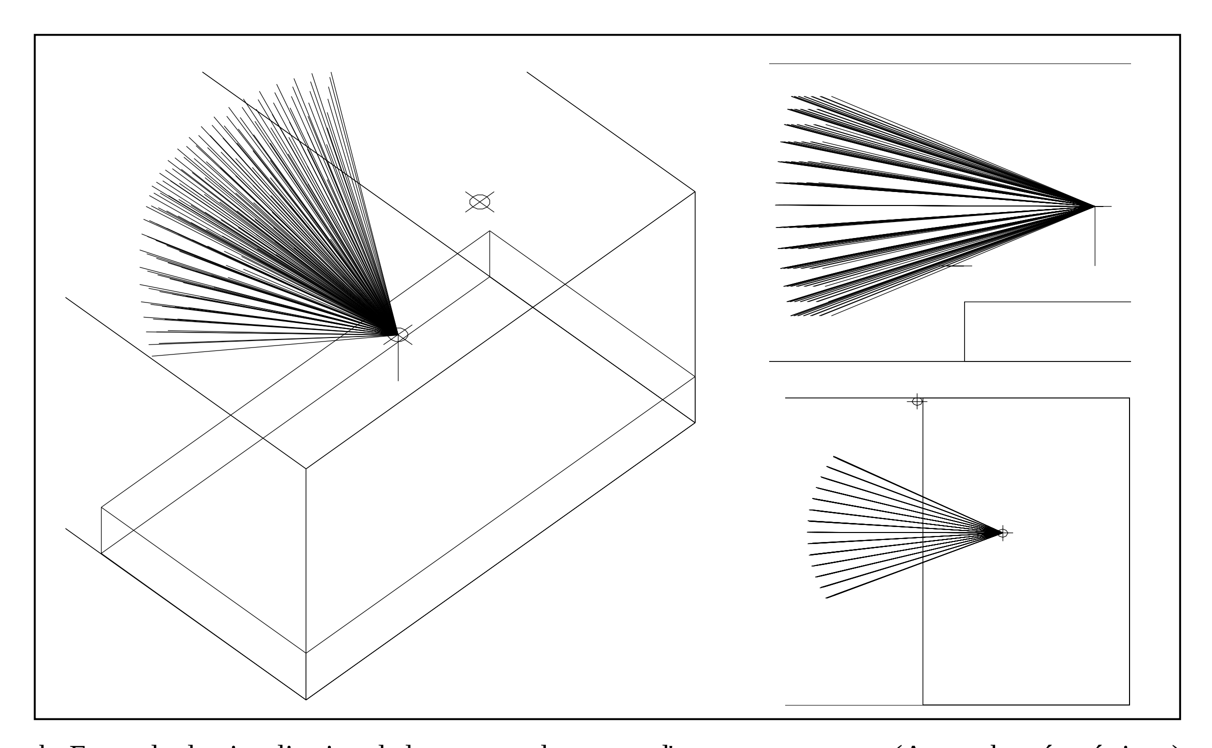
Cette partie illustre d'abord les différentes directions des rayons réfléchis sur des parois selon le type de réflexion. Elle présente différents modèles de réflexion (spéculaire,

Tableau 6.5

Approche géométrique de la composante « Pédagogie »



a. Boite de dialogue présentant tous les aspects de l'approche géométrique de la composante « pédagogie » (plate-forme « CAD-Acoustic »)



b. Exemple de visualisation de lancement de rayons d'une source sonore (Approche géométrique)

diffuse, etc...), en analysant la réaction physique des matériaux et en expliquant à travers ces modèles le comportement des surfaces réfléchissantes et absorbantes en fonction des directions des rayons à travers des exemples de visualisation.

Géométries-formes de salles

Cette partie consiste à présenter différentes études sur la multitude des géométries de salles. Elle visualise des formes de salles entières de musique, de parole et autres. Elle analyse le comportement acoustique de ces formes en fonction de la configuration architecturale et sa finalité. Enfin elle optimise des formes de salles par rapport à leur finalité acoustique à travers des exemples de dessins, de photos et de salles modélisées [Barron, 1993].

Configuration architecturale

Cette partie met en adéquation la configuration architecturale de la salle (orgue, musique symphonique, opéra, variétés, etc...) avec le type et le registre du spectacle (concert, enregistrement, parole). Elle analyse ce rapport afin d'optimiser le design architectural de la salle par rapport à la finalité acoustique du spectacle. Des exemples illustrés montrent la transformation et l'adaptation des éléments architecturaux en vue d'une meilleure qualité acoustique par rapport au changement du registre du spectacle d'une salle.

Aménagement acoustique - Matériaux

Cette étude de l'optimisation de l'aménagement architectural extrêmement importante pour la conception architecturale d'un espace acoustique est à développer et à intégrer dans le cadre déjà conçu de cet outil de plate-forme d'aide en simulation acoustique.

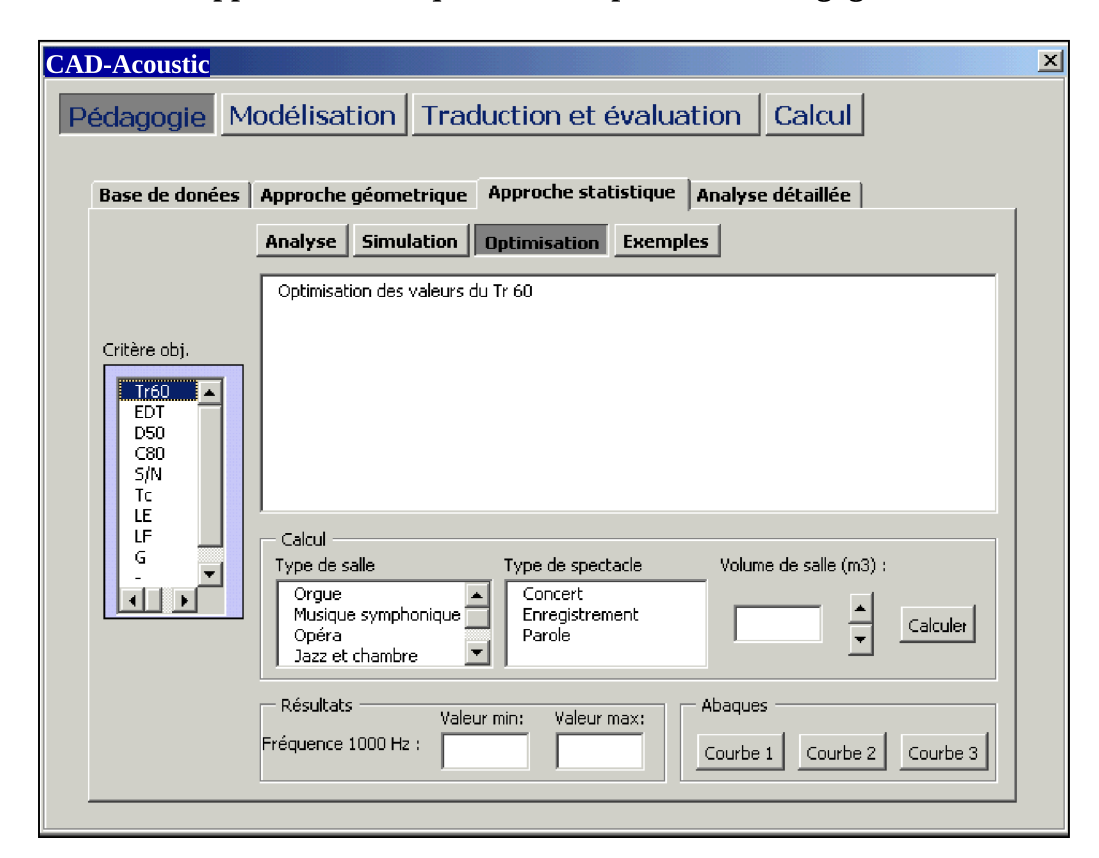
Cette partie va démontrer, à travers des illustrations, le comportement géométrique du son par rapport à des parties de la salle et l'influence de la conception architecturale de chaque partie à la qualité acoustique. Elle conseillera et optimisera l'aménagement acoustique de chaque partie d'une salle (scène, auditoire, plafond, murs latéraux, balcons, etc...) en expliquant leur rôle acoustique par rapport à l'ensemble de la salle et en illustrant leur transformation et adaptation acoustique optimale. Enfin cette partie analysera, illustrera et optimisera la disposition et la répartition des matériaux dans chaque partie de la salle par rapport aux résultats acoustiques.

Analyse

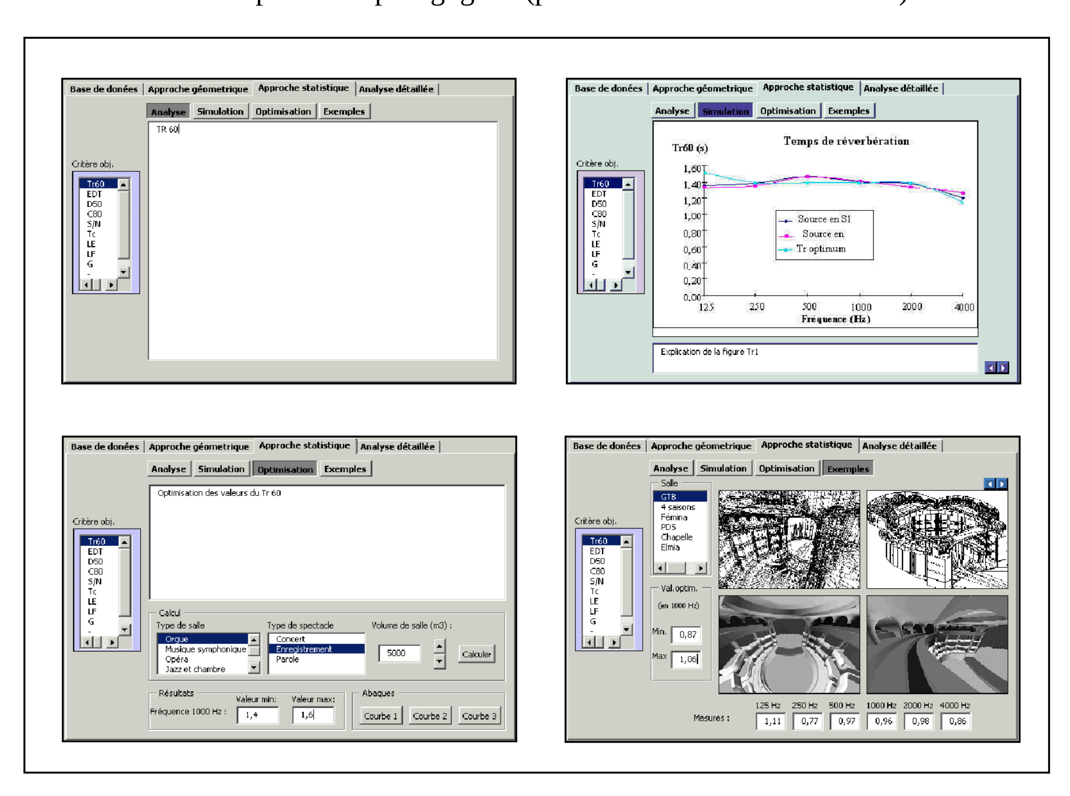
Dans cette partie finale sont illustrés des exemples de salles avec une analyse globale sur tous les aspects géométriques d'une conception acoustique et leurs dépendances et interactivités entre eux. Cette partie globalise et centralise toutes les autres études et analyses

Tableau 6.6

Approche statistique de la composante « Pédagogie »



a. Boite de dialogue présentant les aspects de l'approche statistique de la composante « pédagogie » (plate-forme « CAD-Acoustic »)



b. Boites de dialogue présentant tous les aspects « analyse – simulation – optimisation – exemples » de l'approche statistique

développées dans cette approche géométrique de la partie pédagogie présentée, filtrées toujours à travers un seul exemple traité à chaque fois.

6.2.1.3 Approche statistique

Cette partie est consacrée à la présentation des critères objectifs à travers des analyses, des simulations de courbes, de l'optimisation des valeurs des critères objectifs en fonction de la configuration architecturale et enfin des exemples de valeurs de mesures de salles présentées avec les valeurs optimales (Tableau 6.6a).

Analyse

Il s'agit d'une présentation et analyse textuelle d'un critère objectif sélectionné. Cette partie explique de manière détaillée, entre autre, la contribution, le rôle, la perception, la finalité acoustique de chaque critère objectif ainsi que l'influence des éléments architecturaux et la disposition des matériaux (Tableau 6.6b).

Simulation

Cette partie concerne la simulation des courbes du critère objectif sélectionné avec des explications accompagnées. Un écran défilant visualise les résultats de plusieurs configurations architecturales et positions de sources sonores de différentes salles (Tableau 6.6b).

Optimisation

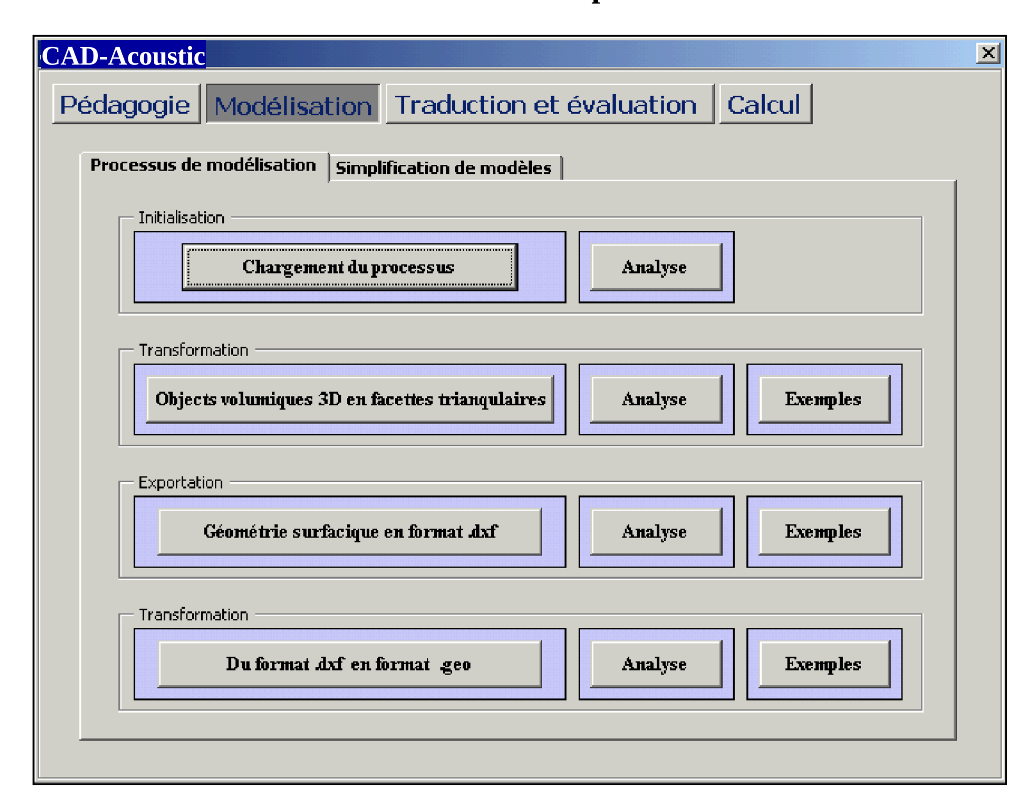
Dans cette partie on calcule les valeurs optimales sous une fréquence moyenne (1000 Hz) du critère objectif sélectionné en fonction du type, du spectacle et du volume de la salle. Ce calcul s'effectue en fonction de l'abaque sélectionné pris de la littérature afin de comparer simultanément les différents résultats. Cette indication des valeurs optimales est une information bibliographique et sert à réfléchir pendant la conception et guider les « décisions acoustiques » en fonction des éléments influents sélectionnés (Tableau 6.6b).

Exemples

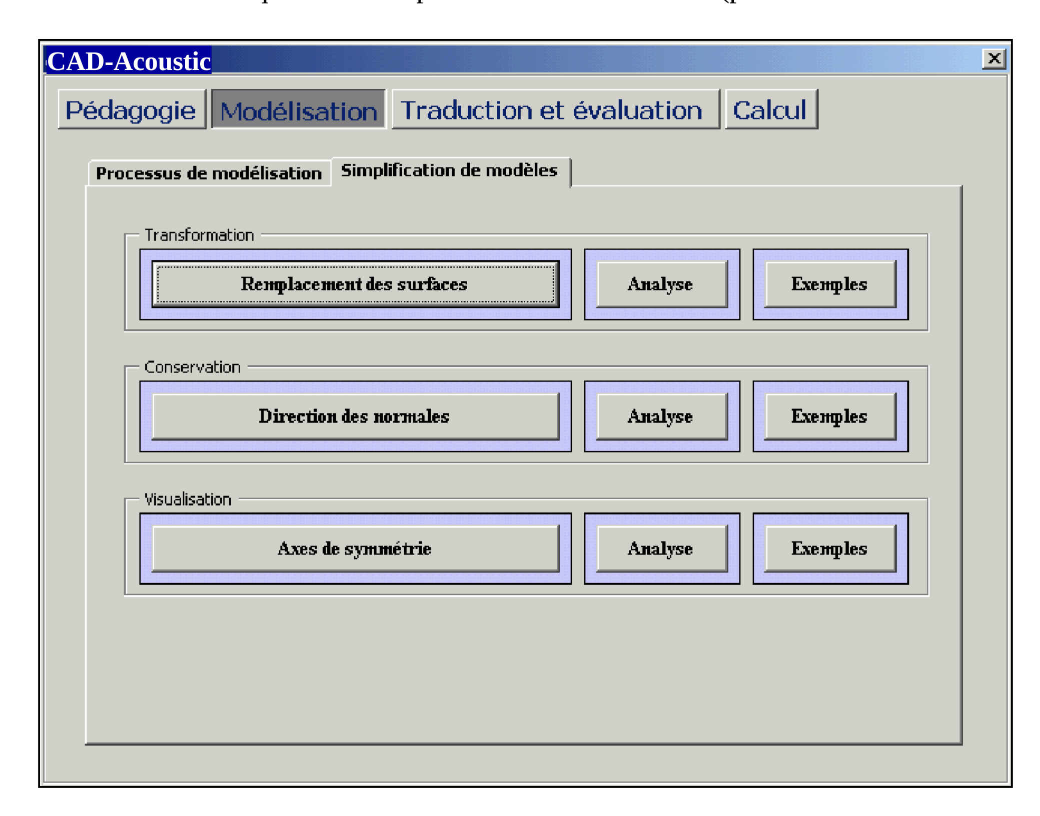
Il s'agit de la consultation des mesures effectuées sur le critère objectif et la salle sélectionnée accompagnés par une iconographie défilant des aspects de la salle en adéquation des positions et des configurations architecturales des mesures effectuées (Tableau 6.6b).

Tableau 6.7

Processus de modélisation de la composante « Modélisation »



a. Boite de dialogue présentant les phases automatisées du processus informatique de modélisation en vue de simulation acoustique de la composante « Modélisation » (plate-forme « CAD-Acoustic »)



b. Boite de dialogue présentant les phases automatisées de la simplification de modèles de la composante « Modélisation » (plate-forme « CAD-Acoustic »)

6.2.1.4 Analyse détaillée

Cette partie est identique à la consultation d'une bibliographie électronique et interactive d'un certain nombre d'éléments acoustiques indispensables pour l'appropriation du fonctionnement acoustique. Elle concerne les phénomènes acoustiques de base (réflexion, absorption, diffusion, diffraction, diverses…), la présentation des courbes, des abaques et des différents diagrammes [Everest, 1998], et elle explique toute l'infrastructure physique et technique sur laquelle sont basées toutes les études développées et intégrées dans cette plate-forme d'aide en simulation acoustique proposée (équations physiques, code informatique de calcul, interfaces techniques d'adaptation des processus informatiques à un système de modélisation C.A.O., etc...) et enfin la bibliographie consultée ou concernée.

6.2.2 Présentation de la composante « Modélisation »

6.2.2.1 Processus de modélisation

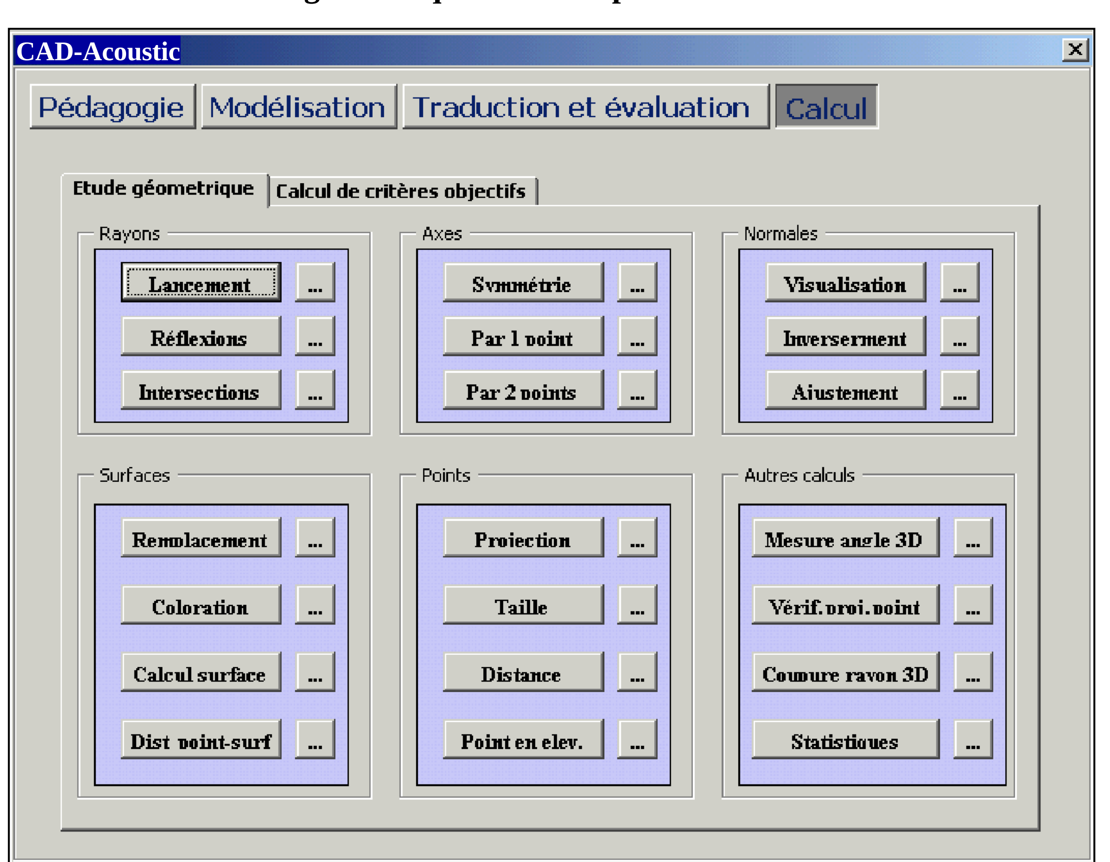
Cette partie de la plate-forme proposée automatise le processus de modélisation. Une option d'initialisation charge l'automatisation des phases. Trois étapes du processus de modélisation principal sont automatisées à travers cette boite de dialogue. La première consiste à transformer tous les objets volumiques 3D de la géométrie de la salle en facettes pour pouvoir ensuite utiliser leurs coordonnées au calcul géométrique et statistique de la simulation acoustique. La deuxième étape, automatisée, consiste à exporter la géométrie surfacique en format d'échange **.dxf*, reconnu par les applications de modélisation C.A.O. La troisième étape, automatisée, consiste à exporter la géométrie modélisée en coordonnées de format ASCII de tous les points des surfaces qui constituent la salle modélisée. Chaque phase automatisée est accompagnée par une explication et analyse détaillée présentant le « comment faire » et les conditions techniques adéquates (cf. chap. 7.1.3) ainsi que des exemples d'illustrations.

6.2.2.2 Simplification de modèles

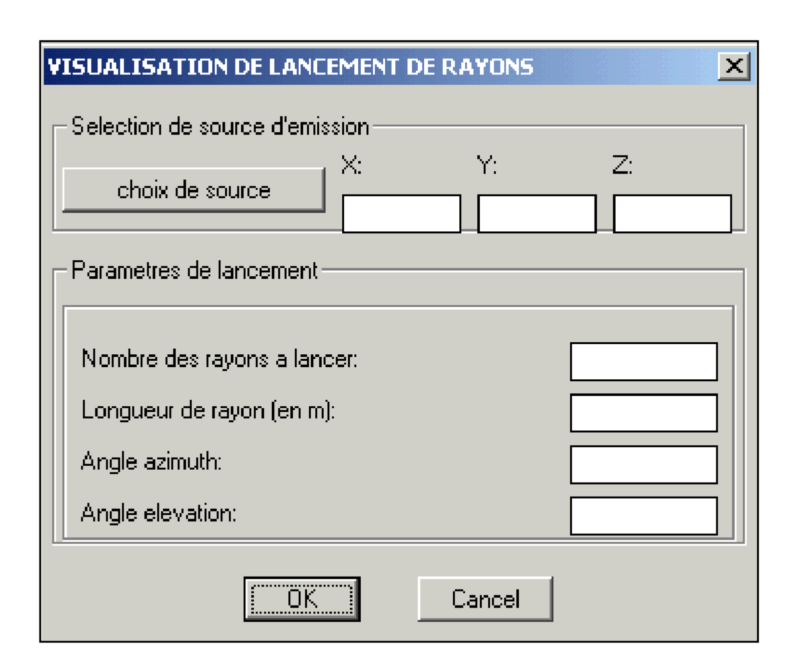
Cette partie automatise les méthodes de simplification des modèles. La première automatisation consiste à remplacer un nombre paramétré des facettes sélectionnées par une seule facette. La deuxième automatisation consiste à calculer et à visualiser d'abord la direction des normales des facettes à remplacer et de la facette remplaçante, et permet ensuite d'ajuster ou non la direction de la normale de la facette remplaçante par rapport à la direction proposée selon la méthode de simplification développée auparavant (cf. chap. 4.4.3). La troisième automatisation consiste à visualiser sur tous les points de vue 3D les axes de symétrie de l'ensemble des surfaces sélectionnées à simplifier et du même ensemble après une éventuelle simplification pour vérifier que la symétrie est maintenue selon la méthode de simplification correspondante (cf. chap. 4.4.3). Chaque méthode automatisée, comme dans le processus de modélisation, est accompagnée par une explication et une analyse détaillée

Tableau 6.8

Étude géométrique de la composante « Calcul »



a. Boite de dialogue présentant toutes les études géométriques de la simulation acoustique de la composante « Calcul »



b. Boite de dialogue de visualisation de tirs de rayons (composante « Calcul »)

présentant le « comment faire » et les conditions et contraintes techniques (cf. chap. 7.1.3) ainsi que par des exemples d'illustrations.

6.2.3 Présentation de la composante « Traduction et évaluation »

Cette partie de traduction et évaluation des valeurs des critères objectifs présentées sous forme des rosaces de comparaison a été développée auparavant de manière analytique dans un chapitre précédent (cf. chap. 5).

6.2.4 Présentation de la composante « Calcul »

6.2.4.1 Etude géométrique

Cette étude concerne différents aspects du calcul géométrique de la simulation acoustique. A travers cette étude géométrique on peut visualiser les résultats du calcul de l'acoustique géométrique. Cette étude porte sur la visualisation des rayons acoustiques, la visualisation des axes d'aide de modélisation et simplification des modèles, la gestion des normales des surfaces, le traitement des surfaces, la gestion des points-repères et enfin d'autres calculs et statistiques géométriques (ex : distance parcourue du son, etc…) (Tableau 6.8a)

Rayons

Cette partie concerne le calcul de visualisation des rayons acoustiques. Il s'agit de la visualisation de l'émission en 3D des rayons à partir d'une source sonore et selon des angles définis (Tableau 6.8b). Cette étude peut s'étendre sur la directivité des rayons en fonction du type des sources sonores au niveau calcul géométrique (visualisation) et au niveau statistique (calcul des critères objectifs). Ensuite cette partie calcule et visualise en 3D toutes les réflexions des rayons sonores émis d'une source sonore et réfléchis sur toutes les parois d'un modèle selon la directivité de la source et le nombre de réflexions souhaité (nombre illimité) (Tableau 6.9b). On a la possibilité de définir la directivité du rayon sonore émis en désignant un point dans l'espace par rapport à la source sonore ou bien en désignant des angles (azimut et élévation) pour définir ce point par rapport à la source sonore (Tableau 6.9a). Enfin, on peut visualiser en 3D l'intersection de n'importe quel rayon avec n'importe quelle surface du modèle [Foley, 1995].

Axes

Il s'agit de création, visualisation et traitement des axes (lignes) d'aide à la modélisation et la simplification de la géométrie de la salle. La visualisation en 3D de l'axe de symétrie d'un ensemble des surfaces à simplifier peut servir à la conservation de la symétrie du modèle avant et après simplification. La création des axes d'aide pendant la modélisation ou bien la simulation acoustique peut aider à la vérification des dispositions des éléments

Tableau 6.9

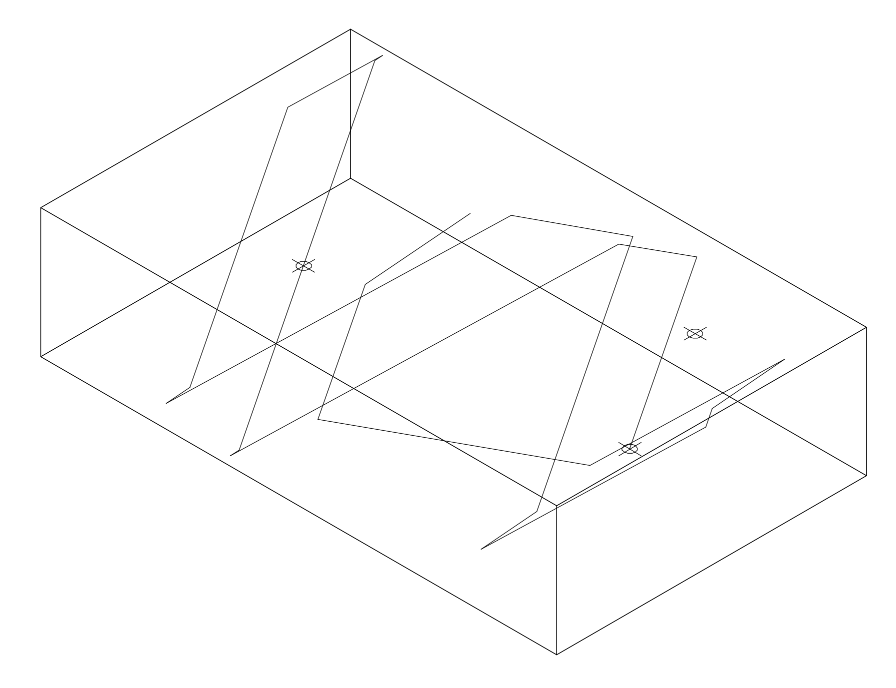
Étude géométrique de la composante « Calcul »

Réflexions
Définition de directivité de source sonore
Par point
Par angles
Lancement de calcul
Réflexions

VISUALISATION DE REFLEXION DE RAYONS
(Définition de directivité de source par point)
Selection de source d'emission
choix de source
X:
Y:
Z:
Parametres de réflexion
Ordre de réflexion:
Selection du point-cible du rayon
choix de point
X:
Y:
Z:
OK
Cancel

VISUALISATION DE REFLEXION DE RAYONS
(Définition de directivité de source par angles)
Selection de source d'emission
choix de source
X:
Y:
Z:
Parametres de réflexion
Ordre de réflexion:
Angle azimuth:
Angle elevation:
OK
Cancel

a. Boites de dialogue présentant le calcul de visualisation de réflexion de rayons (définition de directivité de source par point ou par angle (« Rayons » - composante « Calcul »)



b. Résultats de visualisation de réflexion de rayons à l'aide de la composante « Calcul »

acoustiques entre eux (positions source, récepteur, matériaux, etc...) et à la rapidité et au contrôle des modifications acoustiques effectuées (création des grilles d'axes d'aide en 3D) (Tableau 6.10a).

Normales

Certaines applications de simulation acoustique n'acceptent qu'une géométrie modélisée où toutes les surfaces sont modélisées de manière à ce que toutes les normales des surfaces soient orientées vers l'intérieur de la salle. Afin de permettre ce transfert du modèle vers une application de calcul acoustique il est indispensable de prévoir un mécanisme de traitement et de vérification de modélisation des surfaces en ajustant leurs normales.

Cette partie concerne la création, la visualisation et le traitement des normales des surfaces des modèles (Tableau 6.10b). Le traitement des normales peut s'effectuer de manière individuelle (une ou plusieurs surfaces sélectionnées) ou bien de manière globale (toutes les surfaces du modèle). Dans un premier temps on peut visualiser les normales des surfaces en intervenant sur leur aspect visuel (couleur, longueur, etc...) pour être en adéquation avec l'échelle du modèle utilisée. Après la visualisation on peut inverser la (les) normale(s) des surfaces sélectionnées ou bien traiter globalement toutes les normales des surfaces en les orientant vers l'intérieur de la salle désigné par un point.

Surfaces

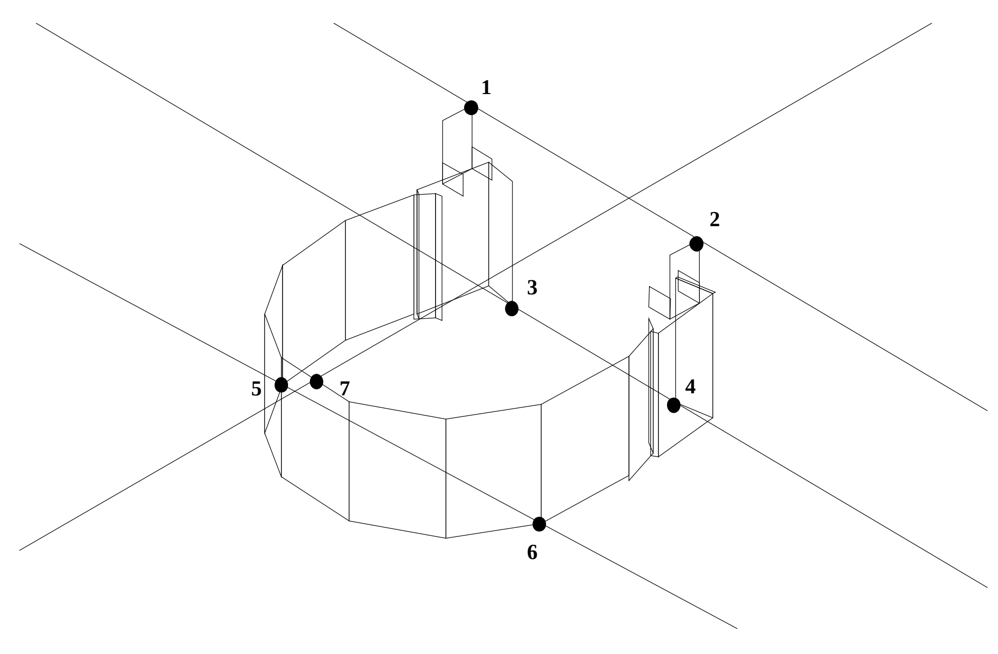
Cette partie concerne le traitement des surfaces du modèle. Il s'agit d'abord du remplacement des surfaces sélectionnées par une seule surface (distinguée d'une coloration différente), pendant la simplification du modèle ou l'enlèvement de la couche extérieure lors du processus de la modélisation en vue de simulation acoustique. Ensuite ce traitement permet de calculer la superficie des surfaces sélectionnées (par exemple, la superficie des matériaux), ou bien la superficie totale de la salle qui sert au calcul entre autre du Temps de Réverbération ou de vérification de changement avant et après simplification du modèle. Enfin la distance entre des points (exemple : source, récepteur, etc...) et des surfaces, permettant d'évaluer et optimiser la position des certains éléments acoustiques par rapport au volume de la salle.

Points

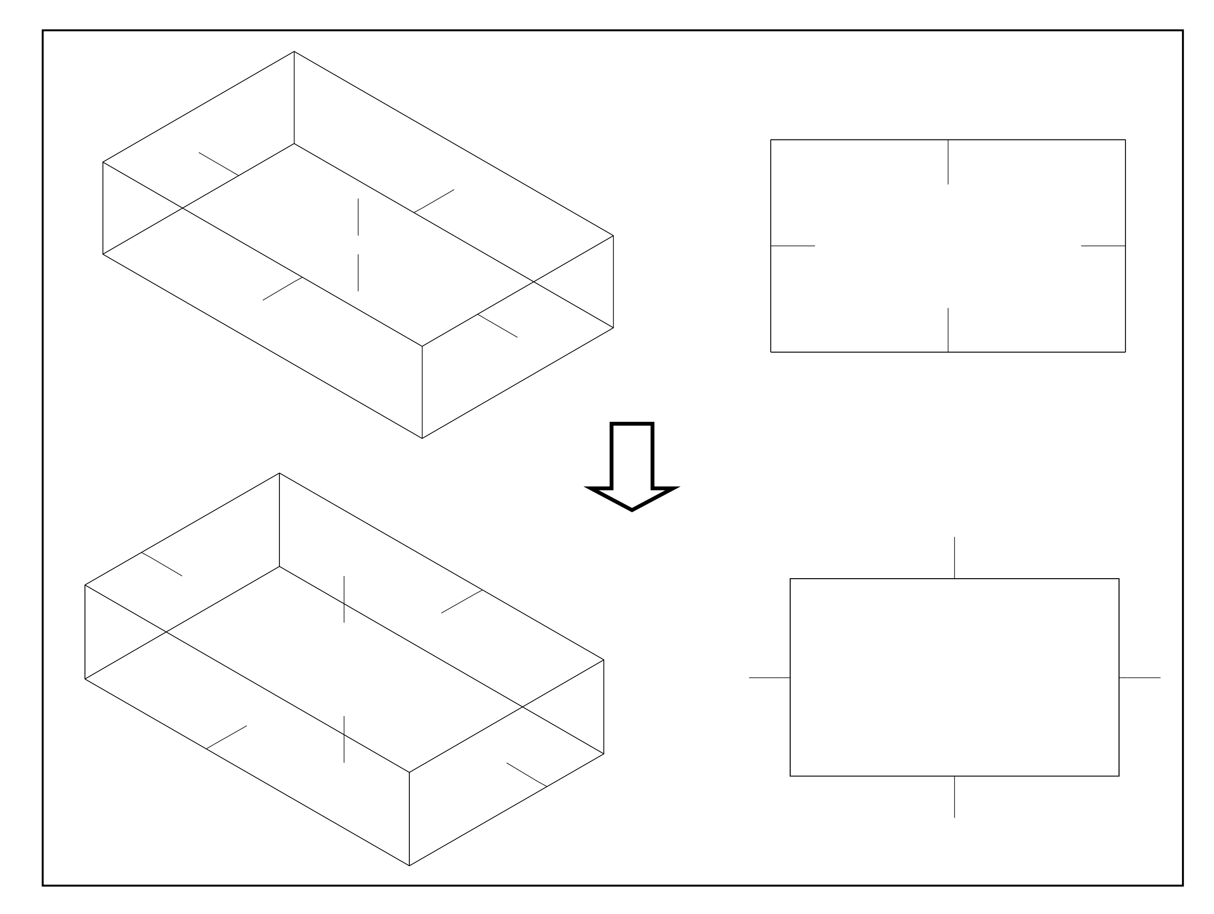
Cette partie concerne la gestion des « points ». Chaque point peut correspondre à un élément acoustique de petite taille (source, etc...) ou bien à un point géométrique d'espace aidant la modélisation. Cette modélisation peut être aidée par la vérification de la projection d'un point par rapport à un plan ou une surface sélectionnée ou bien par la définition d'un point par rapport à un autre en utilisant les angles azimut et élévation ou enfin encore par l'ajustement de la taille d'un point.

Tableau 6.10

Visualisation des certaines études géométriques de la composante « Calcul »



a. Visualisation des axes d'aide de modélisation et de simplification (composante « Calcul »),
1-2 / 3-4 / 5-6 / 7 : points de vérification de symétrie pendant la modélisation ou la simplification



b. Ajustement global des normales des facettes vers l'intérieur du modèle (composante « Calcul »)

Autres calculs

Cette partie porte sur des calculs géométriques divers qui concernent d'abord différentes statistiques telles que la distance totale parcourue par le son par rapport à un nombre de réflexions précis, les coordonnées d'un ou plusieurs points consécutifs d'intersection du rayon avec les parois, etc... Ensuite d'autres possibilités telles que la mesure de l'angle « élévation » entre deux points, la coupure d'un rayon en 3D sur le point souhaité, etc..., aident à l'ajustement géométrique des éléments acoustiques après simulation.

6.2.4.2 Calcul de critères objectifs

Le calcul des critères objectifs s'adresse à une population ayant une connaissance acoustique élevée en présentant les résultats sous forme des courbes graphiques sans comparaison à des valeurs optimales. Cette plate-forme dispose son propre moteur de calcul des critères objectifs soit en présentant des résultats réels calculés soit en évaluant des valeurs des critères objectifs saisies. En même temps cet outil peut devenir une interface de récupération, de présentation ou d'évaluation des résultats acoustiques d'autres moteurs de calcul acoustique beaucoup plus performants. Avant lancer le calcul final des critères, certains éléments acoustiques doivent être définis. A travers la boite de dialogue principal (Tableau 6.11a) on accède à la définition des coordonnées de la source sonore et du récepteur. Ensuite on définit l'humidité et la température de la salle et enfin on accède à la sélection multiple des surfaces et l'affection des coefficients d'absorption (Tableau 6.12a).

Le calcul des valeurs des critères objectifs s'effectue à travers une boite de dialogue et il est multiple, à savoir qu'un calcul simultané de plusieurs critères objectifs est possible (Tableau 6.12b). La saisie forcée des valeurs des critères objectifs dans les zones de l'évaluation de la boite de dialogue à travers les boutons de « points de suspension », oblige le moteur de calcul à présenter ces valeurs comme résultats afin de les évaluer et il évite un réel calcul de(s) critère(s) objectif (s) choisi(s) concernant la salle modélisée. Au cas où les valeurs des critères objectifs seraient calculées par un autre moteur de calcul intégré, ce sont ces valeurs récupérées qui sont présentées comme résultats en évitant le calcul du moteur acoustique de la plate-forme.

Récupération des valeurs des critères objectifs

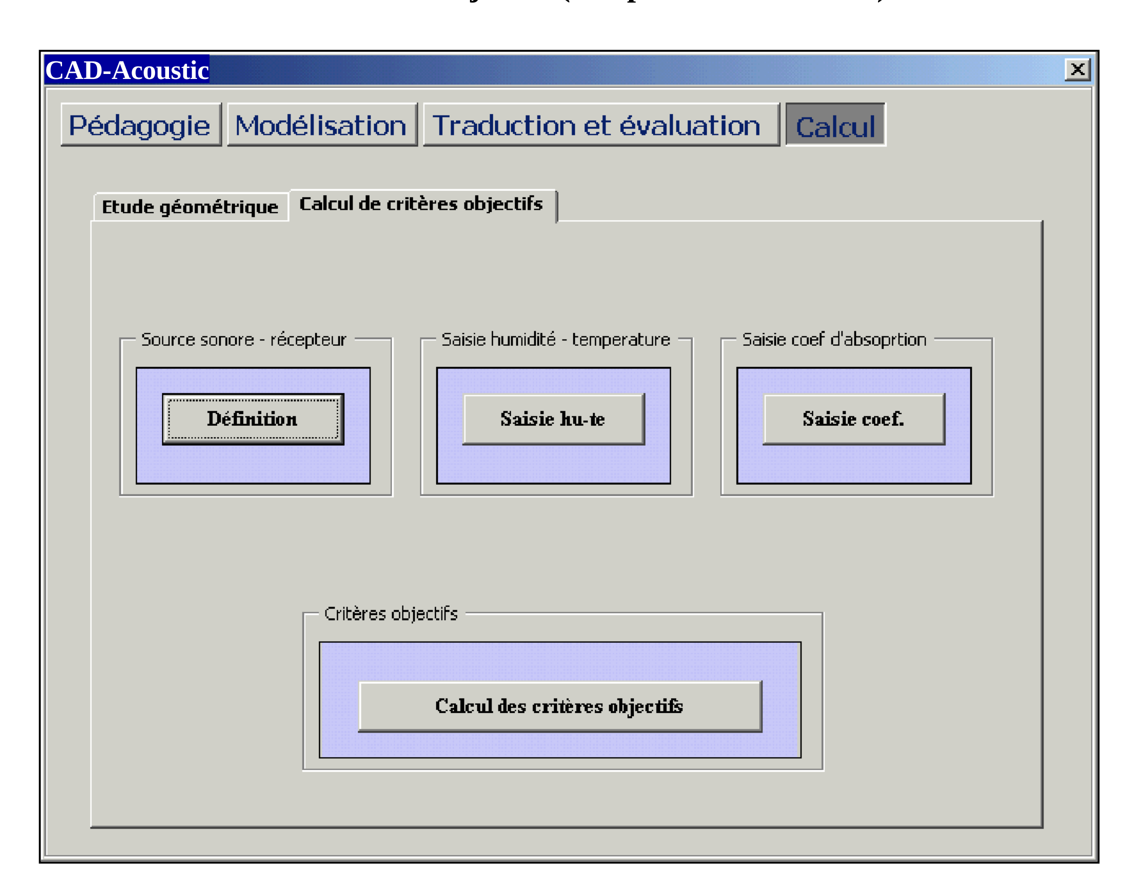
Dans ce calcul « brut » des critères objectifs sans traduction des résultats, chaque critère calculé génère un fichier Excel différent comportant les valeurs obtenues. Ces fichiers sont alimentés soit par le calcul des critères objectifs soit par la saisie des valeurs d'évaluation sans calcul dans la boite de dialogue de calcul (Tableau 6.12b).

Ces fichiers dont le nom est prédéfini sont présentés ci-dessous :

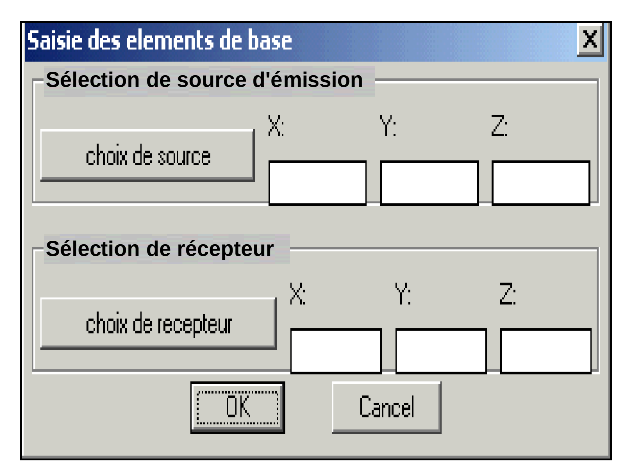
- « texte_calcul.xls » : Ce fichier stocke les caractéristiques de la salle saisie dans la boite de dialogue qui vont alimenter le fichier de présentation des résultats du calcul.

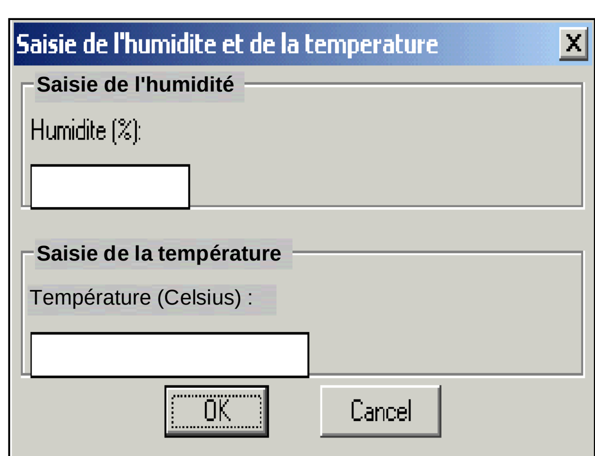
Tableau 6.11

Calcul de critères objectifs (composante « Calcul ») - 1



a. Boite de dialogue présentant l'accès à la saisie des éléments acoustiques indispensables avant le lancement du calcul et l'accès au calcul des critères objectifs (composante « Calcul »)





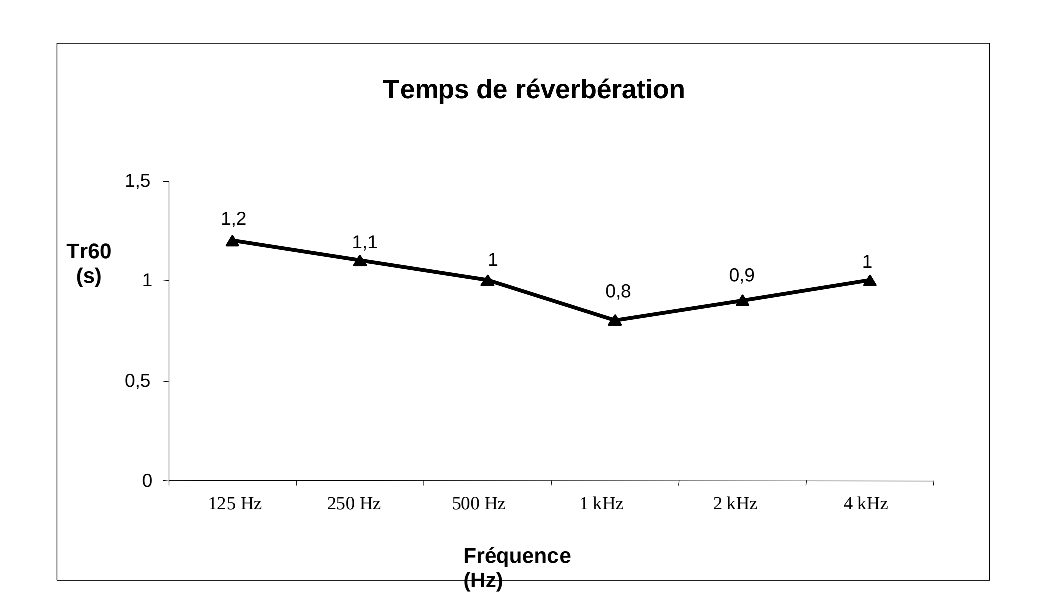
b. Boites de dialogue présentant la saisie de la source sonore / récepteur (gauche) et la saisie de l'humidité et de la température de la salle (droite)

- « data_calcul.xls » : Les valeurs obtenues des critères objectifs, soit par le calcul, soit par la saisie des valeurs d'évaluation.
- « TR.xls – EDT.xls – D50.xls, etc... » : Noms des fichiers générés comportant les résultats acoustiques du critère objectif calculé. Ces fichiers doivent impérativement s'ouvrir en dernier pour mettre à jour toutes les liaisons des autres fichiers qui l'alimentent. Ils présentent les résultats acoustiques sous forme de courbes graphiques.

Le chemin différent de sauvegarde de ces fichiers peut éviter l'écrasement des fichiers des résultats acoustiques existants. Dans le cas d'accès au calcul ou l'évaluation d'un critère objectif à travers une traduction architecturale (fig.19), les fichiers des résultats acoustiques obéissent à des règles différentes (cf. chap. 5.2.2).

Présentation des valeurs des critères objectifs

La présentation du calcul de chaque critère objectif choisi s'exprime à travers le fichier correspondant Excel comportant le nom du critère calculé (ex : TR.xls). Les résultats obtenus sont affichés de manière « brute » sous forme des courbes graphiques sans comparaison avec des valeurs optimales. Ce calcul « brut » et par conséquent sa présentation concerne un ou plusieurs critères objectifs à la fois d'une seule salle sous toutes les bandes de fréquences (fig. 19).

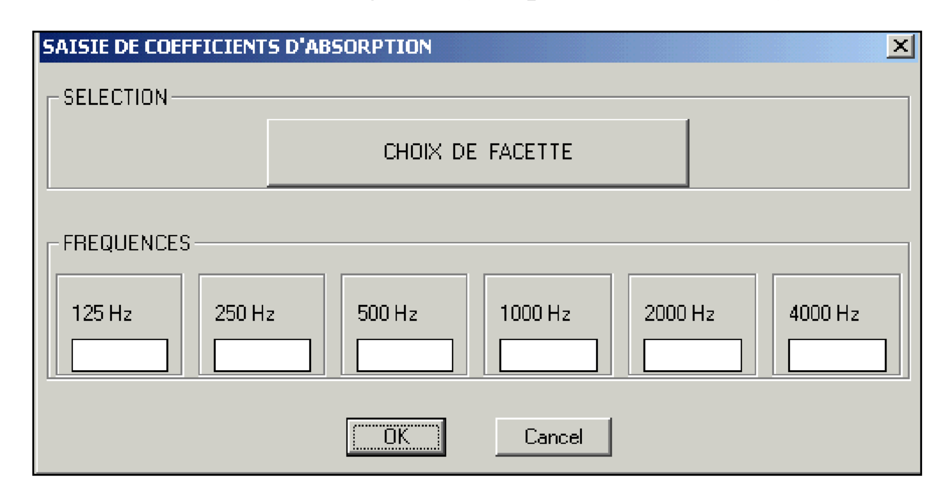


(fig. 19 Présentation sous forme courbe graphique des valeurs obtenues du calcul « brut » d'un critère objectif d'une salle sous toutes les fréquences)

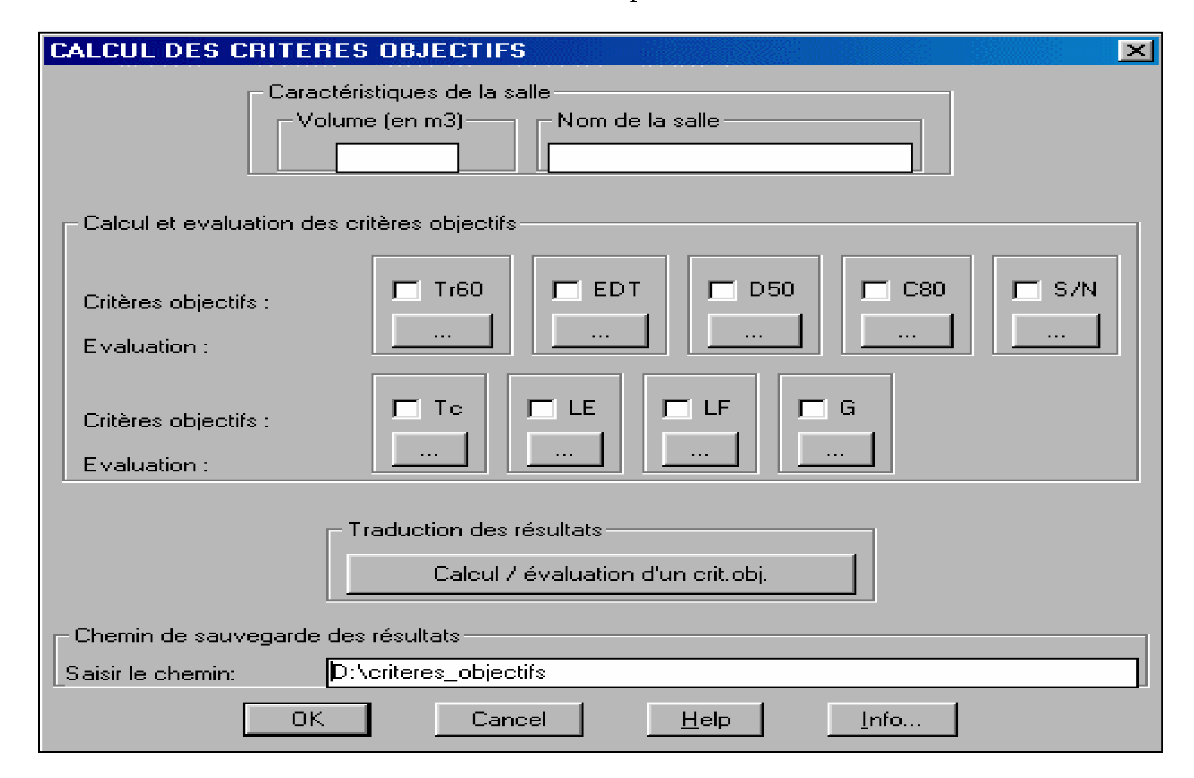
La présentation du calcul d'un critère objectif en fonction des éléments architecturaux avec une traduction et évaluation des résultats a été expliquée précédemment (cf. chap. 5.2.3).

Tableau 6.12

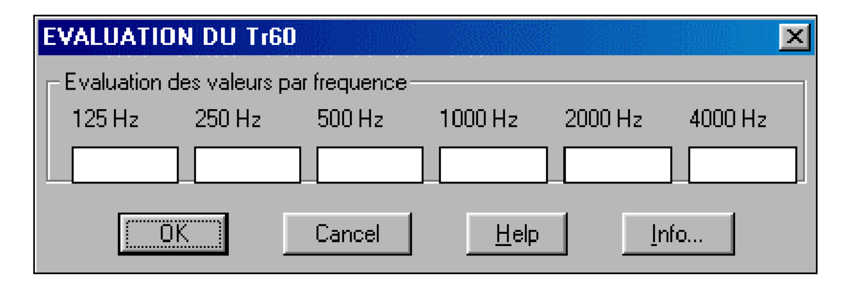
Calcul de critères objectifs (composante « Calcul ») - 2



a. Saisie de coefficients d'absorption des surfaces du modèle



b. Boite de dialogue de calcul et d'évaluation des valeurs des critères objectifs



c. Saisie des valeurs des critères objectifs afin de forcer le système de les évaluer sans procéder au calcul

6.3 Perspectives

Durant les dernières dix années, l'acoustique a essayé d'appliquer toutes les méthodes empiriques de calcul pour une analyse informatique permettant d'étudier plus précisément le comportement sonore qu'auparavant. Au cours de ces dernières années la simulation acoustique devient de plus en plus perfectionnée. Les résultats sont parfois étonnants et offrent une précision remarquable sur la description des principaux critères objectifs.

Les perspectives concernant ce travail ici présenté portent sur :

- le développement complet d'un moteur de calcul acoustique interne en tenant compte la diffusion et en se basant sur des nouvelles approches de calcul acoustique (BRDF) et l'utilisation directe des objets volumiques 3D non coplanaires dans le calcul acoustique,

- le développement complet d'une étude sur l'approche géométrique de la plate-forme proposée (cf. chap. 6.2.1.2) concernant:
a) l'optimisation de la conception architecturale d'un lieu acoustique par rapport à la finalité acoustique du spectacle et l'adéquation de la configuration architecturale,
b) l'optimisation de l'aménagement acoustique de chaque partie d'une salle (scène, auditoire, plafond, murs latéraux, balcons, etc...) ainsi que l'optimisation de la répartition des matériaux et leur influence aux résultats acoustiques. Cette étude va aider pratiquement les architectes de mieux comprendre les impacts acoustiques de leurs choix architecturaux afin d'optimiser leur conception d'un lieu d'écoute,

- L'amélioration graphique et ergonomique de la plate-forme proposée en rendant les propositions ici développées, plus faciles et pratiques à l'utilisation pour les architectes.

Quant aux perspectives générales sur la simulation acoustique qui s'ouvrent à l'horizon, elles suivent une évolution extrêmement rapide. De nouveaux modules commençant peu à peu à s'intégrer à des logiciels de simulation acoustique, comme le « module d'écoute binaurale » qui permet d'écouter des signaux anéchoiques (parole ou musique), convolués à la réponse impulsionnelle du modèle de salle. Cet aspect d' « auralisation », permet de « juger » le son de la salle en différents points, sans y être (!).

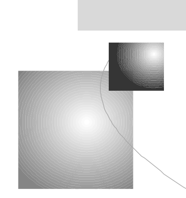
L'évolution du « monde virtuel » avec des simulations d'espaces acoustiques, des images de synthèse et la spécialisation des sources en audioconférence, annonce déjà l'intégration complète et interactive du monde du « multimédia » sur la simulation acoustique. Cet effet permet d'envisager d'utiliser un outil de simulation acoustique - multimédia comme un outil d'enseignement puissant afin d'assurer la compréhension du comportement sonore. L'évolution incroyable de la communication et la mise en place des systèmes de communication en distance définissent déjà des « *outils d'évaluation de qualité acoustique d'un espace à distance* ». On peut déjà imaginer dans un proche avenir le futur acousticien-conseil en train de donner ses conseils et ses premières estimations à distance, sur la qualité acoustique d'un espace (!).

L'intégration des moteurs de calcul et de simulation acoustique d'une part et des modeleurs de modélisation architecturale avec tous les aspects de visualisation d'autre part dans la même interface va permettre le rapprochement du monde de l'acoustique avec celui de l'architecture. La « réalité virtuelle » qui s'introduit de plus en plus dans les résultats de la conception architecturale peut impacter de la même manière la conception acoustique d'une salle. Demain tous les aspects calcul acoustique, modélisation architecturale, auralisation et visualisation peuvent s'intégrer dans une même plate-forme de « réalité virtuelle » et donner la sensation de vivre la réalité de l'aspect architectural et de la qualité acoustique d'une salle, afin d'apprécier et d'évaluer en même temps conception architecturale et acoustique.

L'évolution informatique définie de nouvelles perspectives en donnant un autre élan au domaine de l'acoustique. Ce sont des perspectives parfois « incontrôlables » qu'il faut suivre avec une réflexion « critique » et « judicieuse ».

Chapitre 7

Annexes



7. Annexes

7.1 Présentation technique de la plate-forme d'aide en simulation acoustique
- 7.1.1 Introduction
- 7.1.2 Présentation du moteur de calcul interne / externe
- 7.1.3 Analyse du fonctionnement technique des « routines » informatiques
  - 7.1.3.1 Base de données
  - 7.1.3.2 Approche statistique
  - 7.1.3.3 Processus de modélisation
  - 7.1.3.4 Etude géométrique
- 7.1.4 Etapes analytiques des phases du processus informatique de modélisation

7.2 Calage du modèle de salle sur les mesures par modification des paramètres architecturaux

7.3 Comparaisons des résultats acoustiques

7.4 Critères objectifs usuels et leurs valeurs optimales

7.5 Exemples d'expressions mathématiques et algorithmes utilisés dans les programmes informatiques

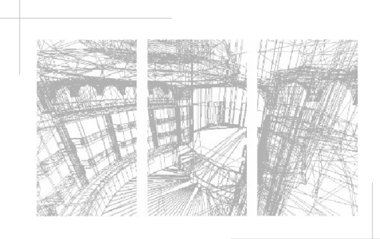


Tableau 7.1

Flux de calcul du Temps de Réverbération (Tr60)

$$Tr = \frac{0{,}163 * V}{[\,\Sigma S_k * a_k + \Sigma n_1 * d * A_1 + 8 * \mu * V\,]}$$

où **V** = Le volume intérieur de la salle,

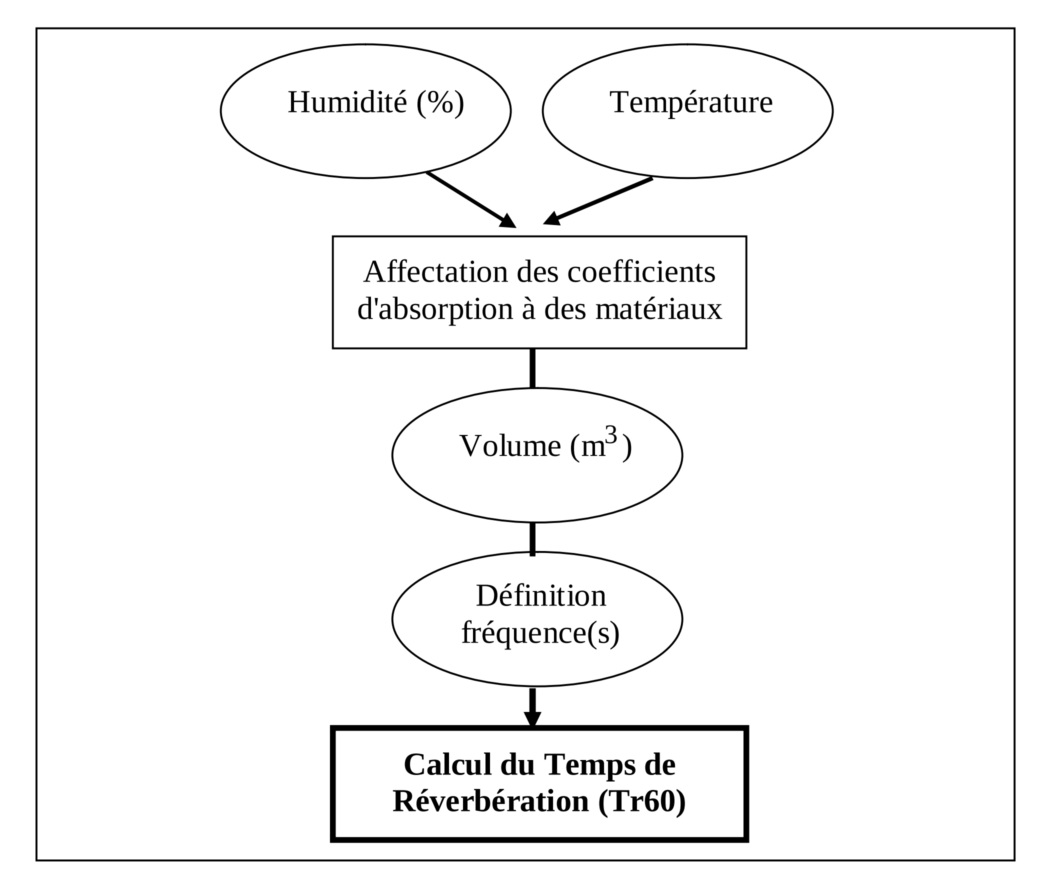
$\Sigma S_k * a_k$ = La somme de l'absorption des matériaux [Surface(S) * Coefficient d'absorption (a)],

$\Sigma n_1 * \delta * A_1$ = La somme de l'absorption de toute personne ou objet,

$\mu = \frac{85}{\phi} * f^2 * 10^{-4}$ où ϕ = le pourcentage d'humidité

f = la fréquence en kHz

a. Équation utilisée dans le calcul acoustique interne du Tr60 [Cremer, 1982]



b. Flux du calcul du Tr60 (moteur de calcul acoustique interne)

7.1 Présentation technique de la plate-forme d'aide en simulation acoustique

7.1.1 Introduction

La plate-forme d'aide en simulation acoustique proposée est développée à l'aide du langage de programmation *Visual BASIC* sous AutoCAD. Chaque recherche qui donne lieu à un développement informatique (« routine ») est intégrée dans cette plate-forme sous forme de programmes appelés autonomes. Ces programmes sont développés à l'aide du langage *Visual LISP* et *DCL* (Dialog Control Language) sous AutoCAD.

7.1.2 Présentation du moteur de calcul acoustique interne / externe

Le moteur de calcul acoustique interne se compose de plusieurs programmes informatiques autonomes qui correspondent chacun au calcul d'un critère objectif ou bien d'un résultat demandé (diagrammes, etc...). Pour cela le calcul d'un critère objectif peut être indépendant des autres ce qui permet de limiter le temps de calcul et de développer et faire évoluer le moteur de calcul dans le temps. Le calcul du Temps de Réverbération (Tr60) est un exemple significatif, développé en tant que programme autonome intégré dans le moteur de calcul acoustique, tandis qu'ont été préparées, en parallèle, les interfaces techniques pour intégrer d'autres calculs de critères objectifs à venir.

Chaque interface technique est amenée à faire le lien entre le programme développé et la plate-forme, tout en récupérant ensuite la valeur calculée du critère objectif afin de présenter les résultats sous forme des courbes graphiques « traditionnelles » (Tableau 5.8b) ou bien « comparatives » (Tableau 5.8a) - (« traduction architecturale », cf. chap. 5).

Le calcul du Tr60 est basé sur l'équation de Sabine (Tableau 7.1a) en tenant compte la dissipation énergétique pendant la propagation du son dans les fréquences médium [Cremer, 1982]. L'organisation (ou « flux ») de ce calcul et ses dépendances avec d'autres calculs (température, humidité, absorption, etc...) est présenté dans le Tableau 7.1b.

Quant au moteur de calcul externe, le calcul se fait à partir des surfaces planes du modèle construit sous AutoCAD, exporté au format d'échange reconnu par le moteur de calcul externe. Les résultats calculés sont récupérés par la plate-forme à travers des interfaces techniques qui repèrent et extraient les valeurs des résultats acoustiques en les transformant sous format ASCII pour les exploiter.

Tableau 7.2

Exemple des liens de programmation entre Visual BASIC - Visual LISP – DCL (Extraits de consultation des présentations de la base externe - plate-forme)

```
; Examples of external commands for command windows
; See also the (STARTAPP) AutoLISP function for an alternative method.
CATALOG,   DIR /W,        8,File specification: ,
DEL,       DEL,           8,File to delete: ,
DIR,       DIR,           8,File specification: ,
EDIT,      START EDIT,    9,File to edit: ,
SH,        ,              1,*OS Command: ,
SHELL,     ,              1,*OS Command: ,
START,     START,         1,*Application to start: ,
TYPE,      TYPE,          8,File to list: ,
WORD,    START WINWORD,  1,File,
POWERPOINT,START POWERPNT, 1,File,
EXCEL,   START EXCEL,           1,File,
IMAGE,   START EXPLORER, 1,File,
SON,       START sndrec32, 1,File,
```

a. Extrait du fichier "acad.pgp" (Traitement du lancement des applications externes sur AutoCAD)

```
Private Sub html_Click()
Form_CAD-Acoustic.Hide
ThisDrawing.SendCommand "html "
ThisDrawing.SendCommand "-vbarun c:\stelios\data\these\vba\CAD-Acoustic.dvb!
Module_CAD-Acoustic. CAD-Acoustic "
End Sub
```

b. Extrait en Visual BASIC de l'intégration d'un programme autonome avec la plate-forme concernant la visualisation d'une présentation

```
(defun c:HTML (/ di )
(setq di (load_dialog "base_externe.dcl"))
 (if (not (new_dialog "html" di))
    (exit)  )
(action_tile "che_html" "(setq chemin_html $value)")
(action_tile "accept" "(done_dialog)")   (action_tile "cancel" "(exit)")
(start_dialog)
(unload_dialog di)
(command "_.browser" chemin_html)  )
```

c. Extrait en Visual LISP du lancement de visualisation d'une présentation

```
// **** HTML ***
html
 : dialog { label = "Base de données -> Consultation -> Base externe ->PRESENTATION HTML" ;
spacer ;
 : row { label = "Chemin du fichier Html" ;
          : edit_box { label = "Fichier à consulter:" ;
                key = "che_html" ;
                value = "c:\\stelios\\data\\autocad\\Gt\\html-Rome\\html\\" ;
   }  }
spacer ;
ok_cancel_help_info ;  }
```

d. Extrait en DCL de la boite de dialogue liée au lancement de visualisation d'une présentation

7.1.3 Analyse du fonctionnement technique des « routines » informatiques

Chaque programme informatique autonome (« routine ») repose sur des exigences et des contraintes informatiques dues à la fois à l'application dans laquelle elle « tourne », au langage de programmation utilisé et aux résultats souhaités. Des programmes développés en langages AutoLISP et DCL sont intégrés dans la plate-forme développé en Visual BASIC ce qui rend la structure de programmation puissante et assez complexe (Tableau 7.2). Dans ce chapitre on présente des informations techniques de fonctionnement des routines en expliquant en même temps des contraintes, des pré-requis, des actions de modification éventuelles et des répercutions de leur manipulation sur le résultat attendu.

7.1.3.1 Base de données

Html (Pédagogie - Consultation – Base externe – Présentation).

Il permet de consulter une présentation faite en format « html ». La saisie du chemin complet et le nom du fichier avec son extension est obligatoire. La consultation se fait à l'aide de l'application « explorer » qui est désignée dans le fichier « acad.pgp » qui traite entre autre le lancement des applications externes à travers une programmation sous AutoCAD. Cette application, comme toute autre, est modifiable (ex : Netscape) dans le fichier « acad.pgp » (Tableau 7.2c/d).

Powerpoint (Pédagogie - Consultation – Base externe – Présentation).

La consultation de cette présentation se fait toujours à l'aide de l'application « PowerPoint » qui est indispensable. Le chemin et le nom complet du fichier est obligatoire. La désignation de l'application n'est pas modifiable dans le fichier « acad.pgp ».

Word - Excel (Pédagogie - Consultation – Base externe – Fichier).

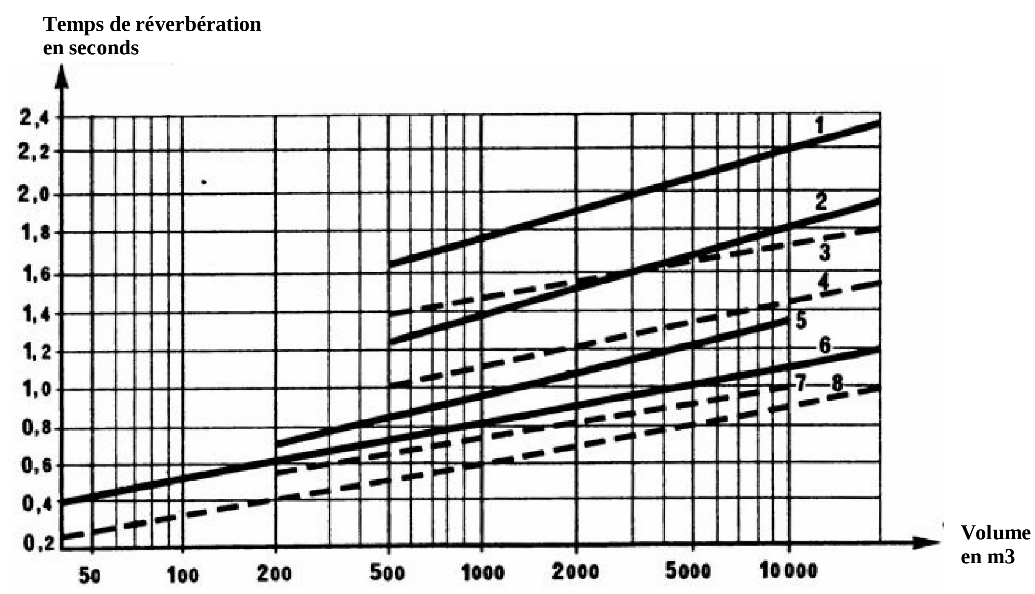
Ils permettent de consulter des fichiers « Word » et tout format lisible par cette application (.doc, .txt, .rtf, .wri, wpd, .wps, etc...), et des fichiers « Excel » et tout format lisible par l'application (.xls, .wks, .dbf, etc...). Le chemin et le nom complet avec extension du fichier est obligatoire. La désignation de l'application n'est pas modifiable dans le fichier « acad.pgp » ce qui rend indispensable la disposition de ces applications.

Image (Pédagogie - Consultation – Base externe – Fichier).

Il permet de visualiser une image de plusieurs formats acceptés (.gif, .bmp, .tif, .jpg, etc…) en lançant par défaut l'application « explorer ». La désignation de l'application de visualisation d'image est possible dans le fichier « acad.pgp » (ex : Acdsee, Paint Shop Pro, etc...).

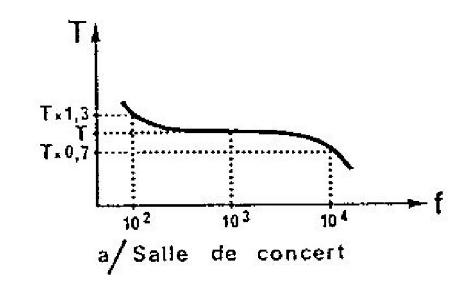
Tableau 7.3

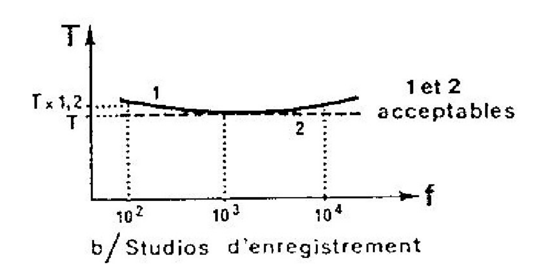
Abaque d'optimisation des valeurs du Tr en fonction du volume et du type de spectacle
(Composante "pédagogie"- Approche statistique - Optimisation)

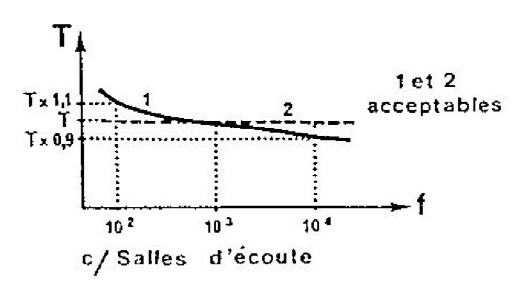


- Temps de réverbération optimal à 1000 Hz :
1 : orgue, audition directe,
2 : musique symphonique, audition directe,
3 : orgue, enregistrement,
4 : opéra, audition directe,
5 : jazz et chambre, direct,
6 : parole, direct,
7 : parole, enregistrement,
8 : variétés, enregistrement.

a. Les valeurs du T_{opt} sont données dans les médiums, 500 ou 1000 Hz suivant les auteurs (ici [Lamoral, 1975]), puis le spectre est tracé selon les considérations données par les courbes ci-dessous (source: [Semidor, 1999])





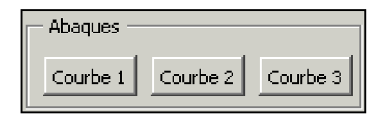


b. Allure spectrale du temps de réverbération optimum pour la musique (a et b) et pour la parole (c) [Lamoral, 1975], (source : [Semidor, 1999])

Son (Pédagogie - Consultation – Base externe – Fichier).

Il permet d'écouter un fichier sonore de format « .wav » à l'aide de l'application par défaut « Sound Recorder » de Microsoft Windows. La désignation de l'application est modifiable.

7.1.3.2 Approche statistique



(Pédagogie – Approche statistique – Optimisation)

Dans la partie « optimisation » de la composante « pédagogie » de la plate-forme, le calcul instantané de la valeur maximale et minimale d'un critère objectif s'effectue en fonction du type de salle, du spectacle et du volume désigné. Ce calcul est basé sur des abaques sélectionnés d'optimisation des valeurs des critères objectifs et varie selon la courbe sélectionnée de l'auteur (ex : Lamoral, etc...) (Tableau 7.3).

7.1.3.3 Processus de modélisation

Chargement du processus (Modélisation – Processus de modélisation)

Il est nécessaire avant d'utiliser les options d'automatisation du processus de modélisation (cf. chap. 4.2) de les charger en activant cette option.

Objects voluniques 3D en facettes triangulaires (Modélisation – Processus de modélisation)

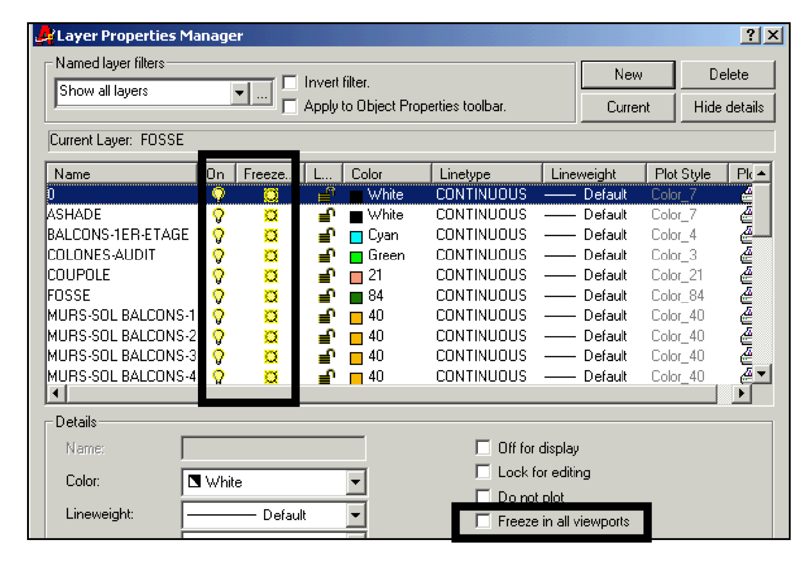
Cette option transforme toute la géométrie du fichier en facettes triangulaires. Tous les calques du fichier (AutoCAD) doivent être actifs afin que tous les objets de la géométrie de l'espace modélisé soient transformés en facettes triangulaires (Tableau 7.4). Avant de lancer pour la première fois seulement cette option il est nécessaire d'activer « l'option d'exportation » en tapant « 3dsout » et ensuite en appuyant sur « échap ». Il est recommandé de travailler sur une copie du fichier *.dwg (3d-AME), afin de pouvoir garder toute la géométrie en solides, car cette option remplace les objets 3D avec des objets surfaciques triangulaires.

Géométrie surfacique en format .dxf (Modélisation – Processus de modélisation)

Cette option exporte la géométrie surfacique simplifiée (*.dwg) en format d'échange *.dxf de manière automatique. Le répertoire et le nom du nouveau fichier *.dxf sont les mêmes par défaut que ceux du fichier exporté *.dwg.

Tableau 7.4

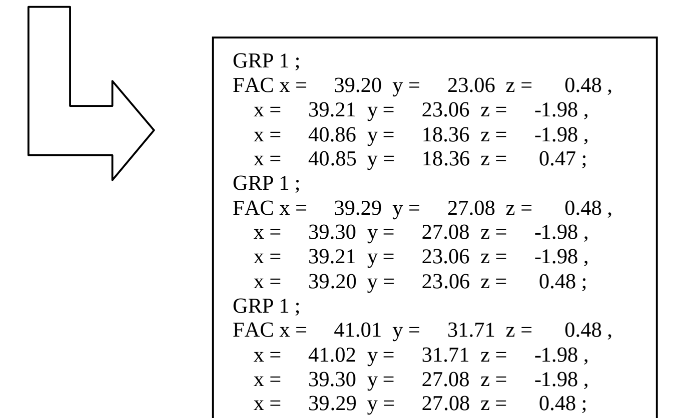
Évolution informatique du modèle, de format .dxf en format .geo



a. Activation de tous les calques sous AutoCAD avant de les exporter en .dxf

0	9	$REGENMODE	70	1	9	$FILLMODE	70	1	9	$QTEXTMODE	70
0	9	$MIRRTEXT	70	1	9	$LTSCALE	40	1.0	9	$ATTMODE	70
1	9	$TEXTSIZE	40	0.2	9	$TRACEWID	40	0.05	9	$TEXTSTYLE	7
STANDARD	9	$CLAYER	8	FOSSE	9	$CELTYPE	6	BYLAYER	9	$CECOLOR	62
2	9	$CELTSCALE	40	1.0	9	$DISPSILH	70	0	9	$DIMSCALE	40
1.0	9	$DIMASZ	40	0.18	9	$DIMEXO	40	0.0625	9	$DIMDLI	40
0.38	9	$DIMRND	40	0.0	9	$DIMDLE	40	0.0	9	$DIMEXE	40
0.18	9	$DIMTP	40	0.0	9	$DIMTM	40	0.0	9	$DIMTXT	40
0.18	9	$DIMCEN	40	0.09	9	$DIMTSZ	40	0	9	$DIMTOL	70
0	9	$DIMLIM	70	0	9	$DIMTIH	70	1	9	$DIMTOH	70
1	9	$DIMSE1	70	0	9	$DIMSE2	70	0	9	$DIMTAD	70
0	9	$DIMZIN	70	0	9	$DIMBLK	1		9	$DIMASO	70
1	9	$DIMSHO	70	1	9	$DIMPOST	1		9	$DIMAPOST	
1	9	$DIMALT	70	0	9	$DIMALTD	70	2	9	$DIMALTF	40
25.4	9	$DIMLFAC	40	1.0	9	$DIMTOFL	70	0	9	$DIMTVP	40
0.0	9	$DIMTIX	70	0	9	$DIMSOXD	70	0	9	$DIMSAH	70
0	9	$DIMBLK1	1		9	$DIMBLK2	1		9	$DIMSTYLE	2

b. Extrait du contenu du fichier *.*dxf* contenant toutes les variables et les caractéristiques des éléments modélisés



```
GRP 1 ;
FAC x =   39.20  y =   23.06  z =   0.48 ,
  x =   39.21  y =   23.06  z =  -1.98 ,
  x =   40.86  y =   18.36  z =  -1.98 ,
  x =   40.85  y =   18.36  z =   0.47 ;
GRP 1 ;
FAC x =   39.29  y =   27.08  z =   0.48 ,
  x =   39.30  y =   27.08  z =  -1.98 ,
  x =   39.21  y =   23.06  z =  -1.98 ,
  x =   39.20  y =   23.06  z =   0.48 ;
GRP 1 ;
FAC x =   41.01  y =   31.71  z =   0.48 ,
  x =   41.02  y =   31.71  z =  -1.98 ,
  x =   39.30  y =   27.08  z =  -1.98 ,
  x =   39.29  y =   27.08  z =   0.48 ;
```

c. Extrait du contenu du fichier *.*geo* (fichier *.*dxf* transformé informatiquement). La transformation informatique ne récupère du fichier *.*dxf* que les coordonnées des facettes

Du format .dxf en format .geo (Modélisation – Processus de modélisation)

Cette option transforme les fichiers *.dxf en format de fichier ASCII *.geo, propre au format du logiciel d'acoustique Epidaure (Tableau 7.4). Il est nécessaire que le nom demandé du fichier *.dxf à convertir en *.geo soit défini avec tout son « parcours informatique (path) », (ex : « *c:\....\nom du fichier sans extension »).* Le nouveau fichier **.geo* est crée dans le même répertoire du fichier **.dxf* par défaut (détails : cf. chap. 7.1.4, phase 6, n°2)

7.1.3.4 Etude géométrique



(Calcul – Etude géométrique)

Il crée des rayons lancés d'un point selon des angles définis. Chaque rayon lancé correspond à une ligne dont la longueur est paramétrable. Tout rayon de lancement se crée automatiquement dans le calque nommé « 90 » ce qui rend plus facile son traitement.



(Calcul – Etude géométrique)

Il permet de trouver le point d'intersection d'un rayon avec une surface. La surface doit obligatoirement être une surface 3DFACE en cas de sélection (surface plane sous AutoCAD) ou bien n'importe quelle surface plane dessinée ou non, dont on désigne ses coordonnées. Cette option dessine soit le point d'intersection soit la ligne prolongée jusqu'à la surface.



(Calcul – Etude géométrique)

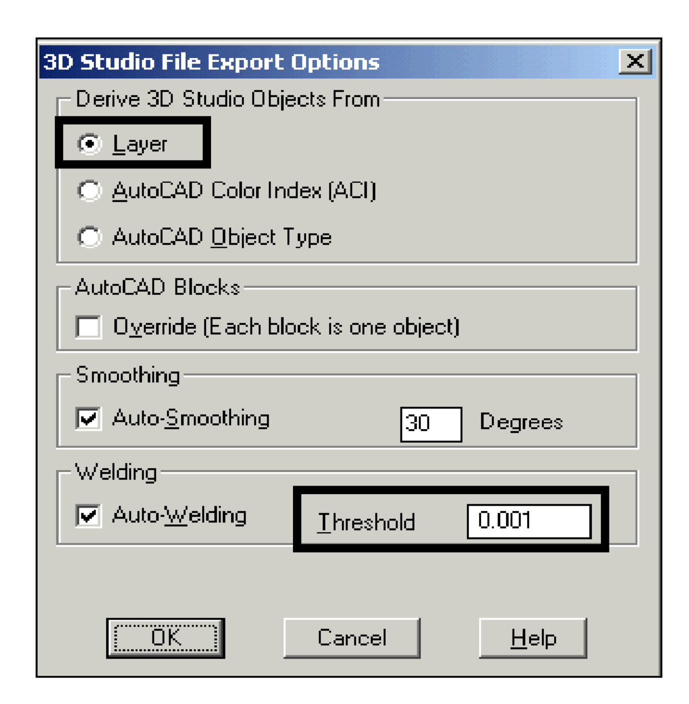
Cette option crée des normales sur les facettes sélectionnées. Chaque normale est constituée de deux lignes (corps et pointe de couleur différente) dont leurs longueurs sont paramétrables pour s'ajuster à l'échelle de visualisation. Toute normale est créée automatiquement dans un calque nommé « 91 », ce qui rend son élimination facile d'un coup.



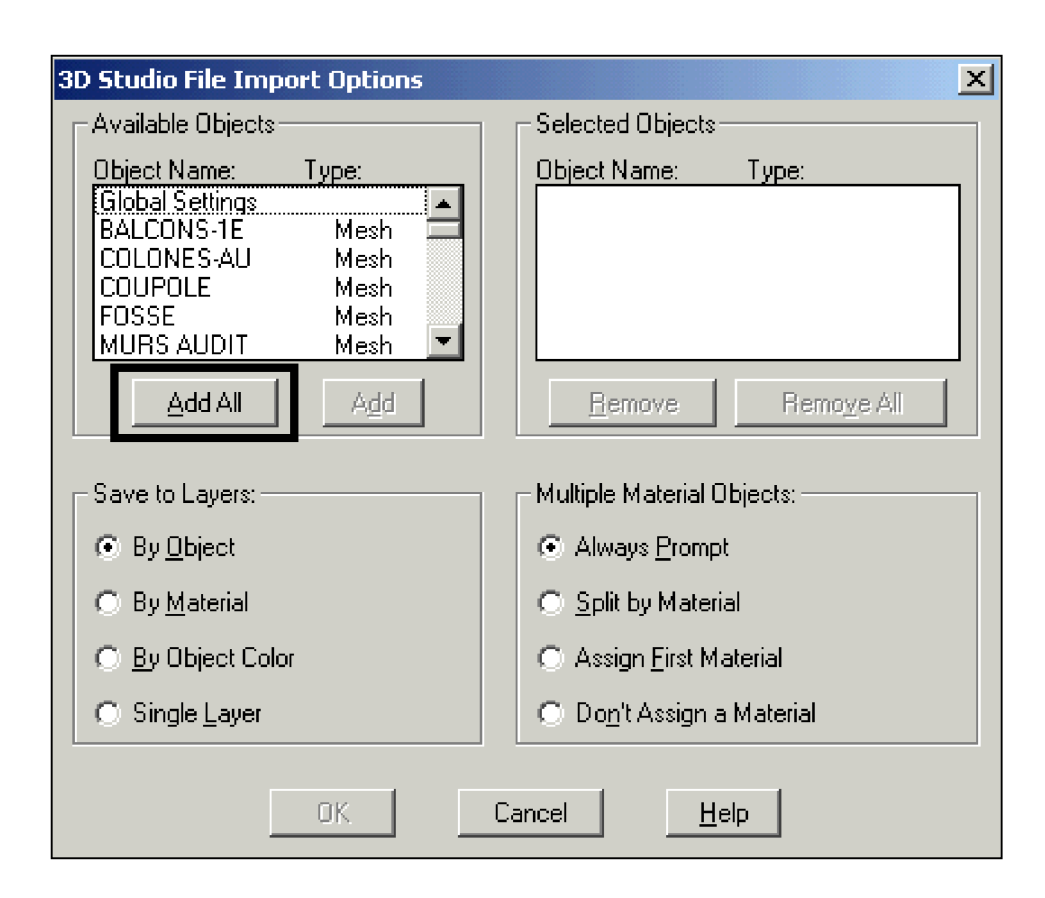
Ces options créent des lignes infinies (axes) dans l'espace 3D. En cas de passage par un point, des angles (azimut et élévation) sont définis. Le changement d'échelle de visualisation n'a pas d'impact sur l'échelle de ces lignes infinies. Tout axe est créé automatiquement dans un calque nommé « 99 » pour faciliter son élimination instantanée. La couleur (jaune) et le type de ligne (continu) sont des éléments par défaut.

Tableau 7.5

Gestion d'exportation et d'importation du volume (.dwg) en facettes (.3ds)



a. Extraction des objets en « *.3ds » à partir du calque avec un faible seuil de soudage



b. Importation de tous les objets surfaciques « *.3ds » dans AutoCAD

7.1.4 Etapes analytiques des phases du processus informatique de modélisation

Phase 2

1. AutoCAD, possède un modeleur qui conçoit des objets volumiques en 3D (AME). Ce modeleur n'applique des « opérations booléennes » que sur ces objets volumiques en 3D, ce qui n'est pas le cas sur les objets surfaciques, comme d'autres logiciels de modélisation. Ceci crée des inconvénients et en même temps peut devenir un outil très utile pour une simulation acoustique cohérente. L'inconvénient consiste à être obligé de passer par une modélisation volumique afin de pouvoir ensuite de transformer ces volumes en facettes, tandis que sur d'autres « logiciels surfaciques », tous les objets sont des objets surfaciques dès leur création et les opérations booléennes sont applicables même sur des surfaces. Mais dans le cas des logiciels surfaciques, les surfaces comportent plusieurs sommets parfois, ce qui reste un souci pour beaucoup de logiciels de calcul d'acoustique d'aujourd'hui, comme Epidaure qui est limité quant au nombre de sommets de chaque facette. En outre, l'application des opérations booléennes sur les objets surfaciques bien compliqués, crée parfois des surfaces gauches, qui ne sont pas non plus acceptées par Epidaure et par aucun logiciel de ce type.

Phase 3

1. A cette étape il faut bien faire attention aux options d'exportation des fichiers 3d studio-max, telles qu'elles nous sont proposées pendant l'exportation du fichier en format **.3ds*. Il est recommandé d'extraire les objets à partir de calque (« option calque »), pour bien respecter le nombre et le contenu de chaque calque (« layer ») du fichier (Tableau 7.5a). En utilisant le format **.3ds* d'exportation, on n'assure que l'exportation des objets volumiques ou surfaciques, en ne prenant pas en compte tous les autres objets qui ne constituent pas un volume ou une surface. Ainsi on n'exporte que la géométrie tridimensionnelle de l'espace et pas les éléments qui ne jouent aucun rôle dans le calcul de la simulation acoustique tels que les lignes, polylignes, hachurages, etc... Pendant cette étape, ce qui est très important, *c'est le fait de pouvoir régler le nombre des futures facettes par l'option proposée « seuil de soudage » (« threshold ») lors de l'exportation du fichier en *.3ds (Tableau 7.5a).* A l'aide de cette option on arrive à « souder » un grand nombre des points des objets par rapport à leurs distances -entre eux-, afin d'arriver à constituer une géométrie plus simplifiée, comportant une élimination considérée d'un grand nombre des points et par conséquent des facettes. Plus on augmente le « seuil de soudage », plus on élimine un grand nombre des facettes en simplifiant la géométrie modélisée. Cette « simplification automatique », doit être réglée avec prudence afin de garder une géométrie simplifiée qui correspond à la fois, le plus possible, à la géométrie réelle et complexe de l'espace sonore.

2. Pendant cette procédure on charge toute la géométrie en choisissant dans l'option proposée « d'ajouter tous » (« add all ») les éléments qui constituent cette modélisation (Tableau 7-5b). Il serait vivement recommandé d'importer le fichier **.3ds* « simplifié » (grand nombre de seuils de soudage) ainsi que le même fichier **.3ds* « non simplifié » (petit nombre de seuils de soudage) à partir du 3D studio-max et les sauvegarder en format **.max* qui est le propre format de sauvegarde de 3D studio-max.

Tableau 7.6

Élaboration des fichiers des coordonnées des facettes ".geo" en vue de simulation acoustique

Modèle décomposé en plusieurs fichiers ".geo"

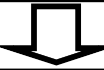
```
GRP 1 ;
FAC x =   37.39  y =   15.89  z =    3.15 ,
    x =   37.34  y =   16.24  z =    3.15 ,
    x =   37.34  y =   16.24  z =   10.65 ,
    x =   37.39  y =   15.89  z =   10.65 ;
GRP 1 ;
FAC x =   37.07  y =   15.73  z =   10.65
,
    x =   37.39  y =   15.89  z =   10.65 ,
    x =   37.39  y =   15.89  z =    3.15 ,
    x =   37.07  y =   15.73  z =    3.15 ;
GRP 1 ;
FAC x =   36.82  y =   15.99  z =    3.15 ,
    x =   37.07  y =   15.73  z =    3.15 ,
    x =   37.07  y =   15.73  z =   10.65 ,
    x =   36.82  y =   15.99  z =   10.65 ;
```

```
GRP 1 ;
FAC x =   26.32  y =   22.69  z =    6.32 ,
    x =   25.22  y =   22.35  z =    6.32 ,
    x =   25.22  y =   22.35  z =    5.62 ,
    x =   26.32  y =   22.69  z =    5.62 ;
GRP 1 ;
FAC x =   25.05  y =   27.46  z =    5.62 ,
    x =   26.29  y =   27.11  z =    5.62 ,
    x =   26.29  y =   27.11  z =    6.32 ,
    x =   25.05  y =   27.46  z =    6.32 ;
GRP 1 ;
FAC x =   26.28  y =   23.50  z =    6.32 ,
    x =   24.85  y =   23.08  z =    6.32 ,
    x =   24.85  y =   23.08  z =    5.62 ,
    x =   26.28  y =   23.50  z =    5.62 ;
```

```
GRP 1 ;
FAC x =   44.56  y =   19.00  z =   -1.98 ,
    x =   40.86  y =   18.36  z =   -1.98 ,
    x =   40.61  y =   18.47  z =   -1.98 ,
    x =   39.21  y =   23.06  z =   -1.98 ;
GRP 1 ;
FAC x =   39.21  y =   23.06  z =    0.28 ,
    x =   39.21  y =   23.06  z =   -1.98 ,
    x =   40.61  y =   18.47  z =   -1.98 ,
    x =   40.62  y =   18.47  z =    0.26 ;
GRP 1 ;
FAC x =   39.30  y =   27.08  z =   -1.98 ,
    x =   44.54  y =   31.08  z =   -1.98 ,
    x =   44.56  y =   19.00  z =   -1.98 ,
    x =   39.21  y =   23.06  z =   -1.98 ;
```

```
• • •
• • •
• • •
• • •
• • •
• • •
```

a. Chaque fichier « *.geo » est généré automatiquement au Groupe 1 (GRP 1)



Modification (incrémentation) du nom de chaque fichier ".geo"

```
GRP 1 ;
FAC x =   37.39  y =   15.89  z =    3.15 ,
    x =   37.34  y =   16.24  z =    3.15 ,
    x =   37.34  y =   16.24  z =   10.65 ,
    x =   37.39  y =   15.89  z =   10.65 ;

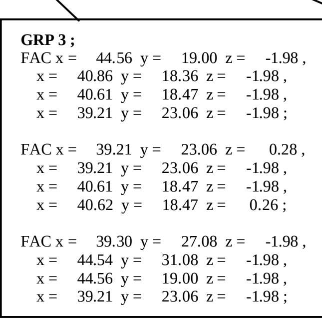
FAC x =   37.07  y =   15.73  z =   10.65
,
    x =   37.39  y =   15.89  z =   10.65 ,
    x =   37.39  y =   15.89  z =    3.15 ,
    x =   37.07  y =   15.73  z =    3.15 ;

FAC x =   36.82  y =   15.99  z =    3.15 ,
    x =   37.07  y =   15.73  z =    3.15 ,
    x =   37.07  y =   15.73  z =   10.65 ,
    x =   36.82  y =   15.99  z =   10.65 ;
```

```
GRP 2 ;
FAC x =   26.32  y =   22.69  z =    6.32 ,
    x =   25.22  y =   22.35  z =    6.32 ,
    x =   25.22  y =   22.35  z =    5.62 ,
    x =   26.32  y =   22.69  z =    5.62 ;

FAC x =   25.05  y =   27.46  z =    5.62 ,
    x =   26.29  y =   27.11  z =    5.62 ,
    x =   26.29  y =   27.11  z =    6.32 ,
    x =   25.05  y =   27.46  z =    6.32 ;

FAC x =   26.28  y =   23.50  z =    6.32 ,
    x =   24.85  y =   23.08  z =    6.32 ,
    x =   24.85  y =   23.08  z =    5.62 ,
    x =   26.28  y =   23.50  z =    5.62 ;
```



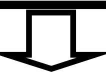
```
GRP 3 ;
FAC x =   44.56  y =   19.00  z =   -1.98 ,
    x =   40.86  y =   18.36  z =   -1.98 ,
    x =   40.61  y =   18.47  z =   -1.98 ,
    x =   39.21  y =   23.06  z =   -1.98 ;

FAC x =   39.21  y =   23.06  z =    0.28 ,
    x =   39.21  y =   23.06  z =   -1.98 ,
    x =   40.61  y =   18.47  z =   -1.98 ,
    x =   40.62  y =   18.47  z =    0.26 ;

FAC x =   39.30  y =   27.08  z =   -1.98 ,
    x =   44.54  y =   31.08  z =   -1.98 ,
    x =   44.56  y =   19.00  z =   -1.98 ,
    x =   39.21  y =   23.06  z =   -1.98 ;
```

```
• • •
• • •
• • •
• • •
• • •
• • •
```

b. Pour faciliter la gestion des surfaces, chaque fichier ".geo" appartient à un groupe différent. Élimination du nom de groupe de chaque facette sauf le nom de groupe en première ligne qui affecte toutes les facettes jusqu'au nom de groupe suivant. Vérification du nombre des facettes dans chaque groupe (= < 100), et du nombre des groupes (= < 25) (Epidaure)



Rassemblement de tous les fichiers ".geo" dans un nouveau fichier mère "*.geo"

```
GRP 1 ;
FAC x =   37.39  y =   15.89  z =    3.15 ,
    x =   37.34  y =   16.24  z =    3.15 ,
    x =   37.34  y =   16.24  z =   10.65 ,
    x =   37.39  y =   15.89  z =   10.65 ;

FAC x =   37.07  y =   15.73  z =   10.65 ,
    x =   37.39  y =   15.89  z =   10.65 ,
    x =   37.39  y =   15.89  z =    3.15 ,
    x =   37.07  y =   15.73  z =    3.15 ;

FAC x =   36.82  y =   15.99  z =    3.15 ,
    x =   37.07  y =   15.73  z =    3.15 ,
    x =   37.07  y =   15.73  z =   10.65 ,
    x =   36.82  y =   15.99  z =   10.65 ;

GRP 2 ;
FAC x =   26.32  y =   22.69  z =    6.32 ,
    x =   25.22  y =   22.35  z =    6.32 ,
    x =   25.22  y =   22.35  z =    5.62 ,
    x =   26.32  y =   22.69  z =    5.62 ;

FAC x =   25.05  y =   27.46  z =    5.62 ,
    x =   26.29  y =   27.11  z =    5.62 ,
    x =   26.29  y =   27.11  z =    6.32 ,
    x =   25.05  y =   27.46  z =    6.32 ;

FAC x =   26.28  y =   23.50  z =    6.32 ,
    x =   24.85  y =   23.08  z =    6.32 ,
    x =   24.85  y =   23.08  z =    5.62 ,
    x =   26.28  y =   23.50  z =    5.62 ;

GRP 3 ;
FAC x =   44.56  y =   19.00  z =   -1.98 ,
    x =   40.86  y =   18.36  z =   -1.98 ,
    x =   40.61  y =   18.47  z =   -1.98 ,
    x =   39.21  y =   23.06  z =   -1.98 ;

FAC x =   39.21  y =   23.06  z =    0.28 ,
    x =   39.21  y =   23.06  z =   -1.98 ,
    x =   40.61  y =   18.47  z =   -1.98 ,
    x =   40.62  y =   18.47  z =    0.26 ;

FAC x =   39.30  y =   27.08  z =   -1.98 ,
    x =   44.54  y =   31.08  z =   -1.98 ,
    x =   44.56  y =   19.00  z =   -1.98 ,
    x =   39.21  y =   23.06  z =   -1.98 ;

• • •
• • •
• • •
• • •
• • •
• • •
```

c. Fichier mère "*.geo" rassemblant tous les contenus des fichiers ".geo" à l'aide d'un traitement de texte ASCII. Le fichier "mère" doit obligatoirement avoir l'extension "*.geo"

Phase 4

1. Pour cette élimination, on utilise à part l'option « effacer », l'option du système des coordonnées « scu » afin de bien pouvoir sélectionner les facettes « cohérentes ». Dans un deuxième temps, on définit avec une autre couleur les nouvelles facettes afin de pouvoir bien les distinguer des facettes triangulaires. Ainsi en utilisant les filtres de sélection d'AutoCAD, on arrive à ne sélectionner que les facettes triangulaires pour les remplacer par la suite par des facettes quadrangulaires.

Phase 6

1. Ceci pourrait se faire soit en utilisant l'option « exporter en **.dwg* », soit en se servant de la commande d'AutoCAD « wbloc » qui exporte des objets sélectionnés (dans ce cas tout le calque) en fichier **.dwg*. Ainsi on a la possibilité d'exporter chaque calque en bloc (fichier **.dwg*), tout en gardant le fichier final-simplifié des calques (**.dwg*), afin de pouvoir s'en servir à nouveau au cas d'une erreur de sélection des calques. Il est à noter que pendant l'exportation sur AutoCAD de chaque calque en bloc (**.dwg*), les objets exportés disparaissent de l'écran pour « fonder » le nouveau bloc. Dans ce cas, il y a deux façons d'amener ce processus. La première consiste à utiliser l'outil de l'annulation (commande : Annuler-U) en n'annulant que l'affichage de l'écran et pas l'opération d'exportation du fichier en bloc, afin de récupérer les objets disparus sur écran pour pouvoir ensuite enregistrer tous ces calques dans leur fichier final **.dwg*. La deuxième façon consiste à travailler sur le fichier-copie du fichier final de modélisation qui comporte les calques à exporter.

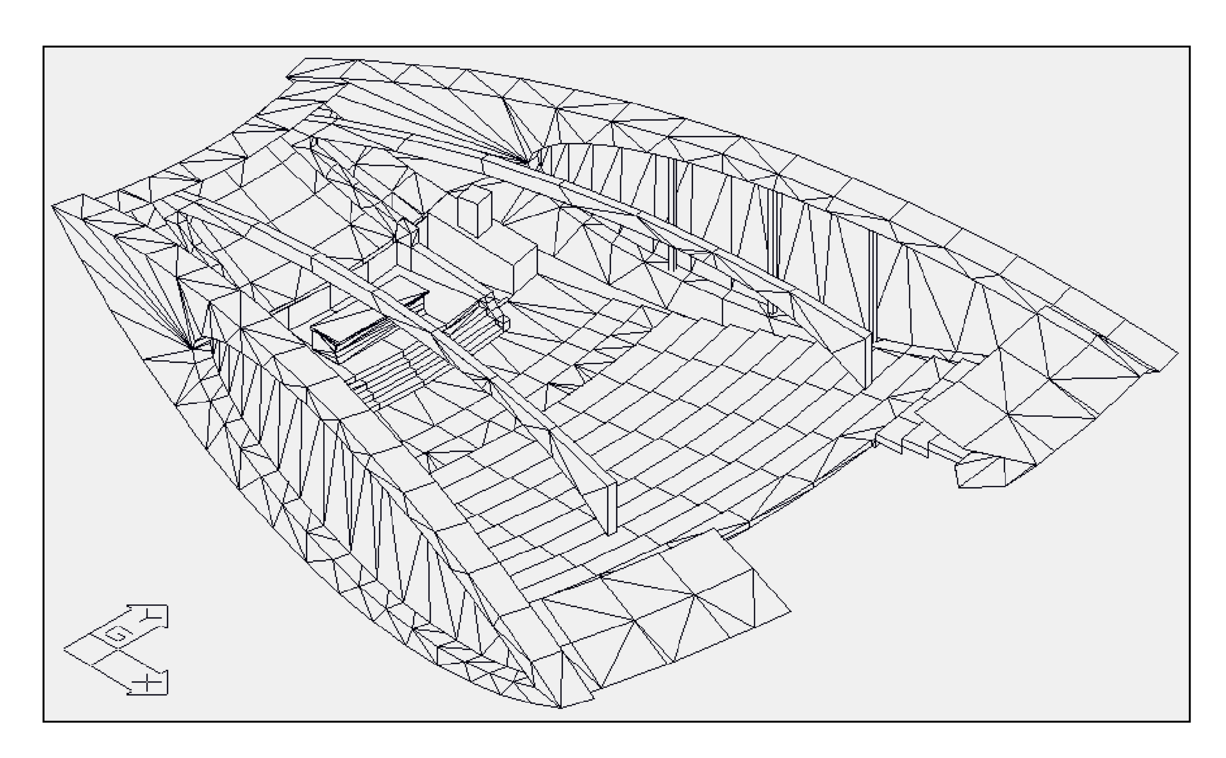
2. Dans le cas d'Epidaure on passe par l'intermédiaire d'un fichier exécutable de transformation des fichiers **.dxf* en format **.geo*, afin de pouvoir intégrer toute la géométrie dans le logiciel. Autrement dit ceci se fait en respectant la commande suivante :

« lire_dxf < fichier.dxf > fichier.geo »

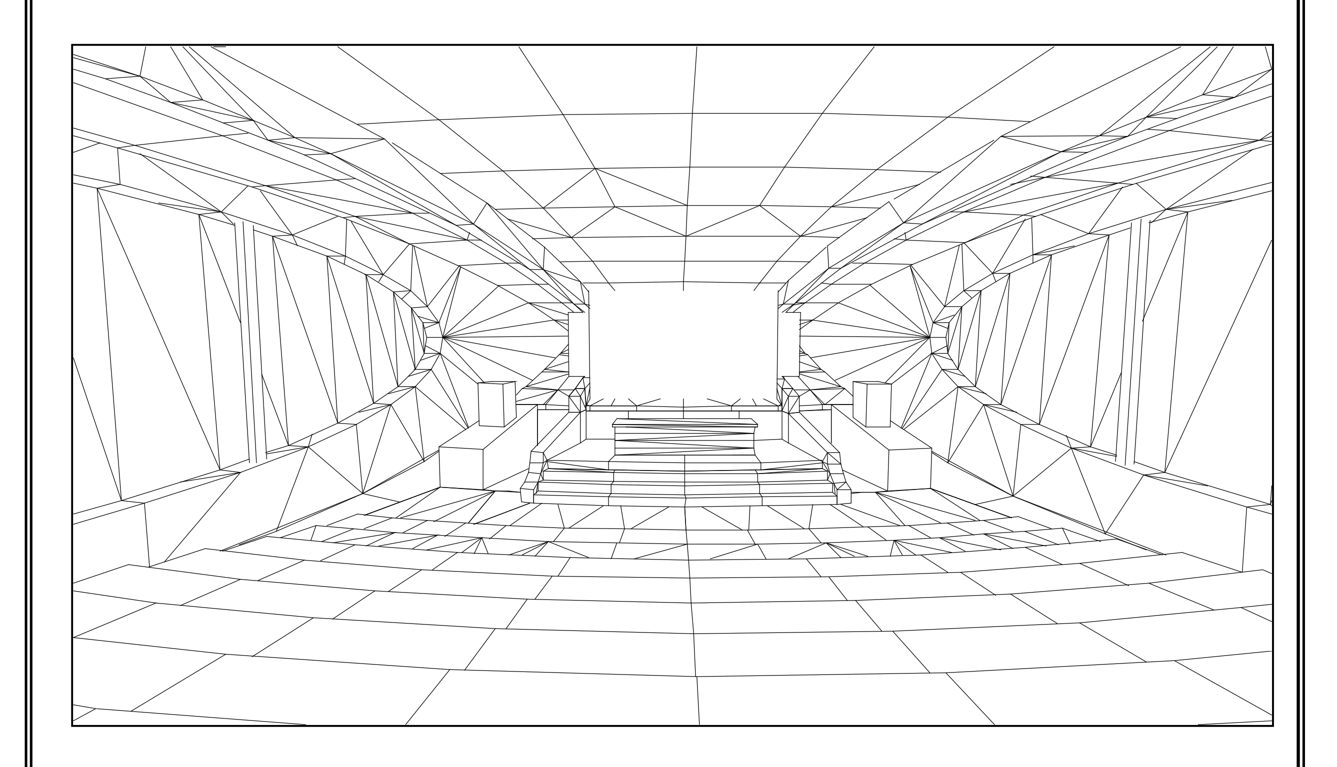
Le fichier de format **.geo*, est un fichier de texte ASCII que l'on peut gérer à l'aide d'un traitement de texte ASCII. L'élaboration des fichiers **.geo* devient une opération indispensable afin de pouvoir rassembler tous les fichiers **.geo* dans un « *fichier-mère* », qui comporte toute la géométrie de l'espace concerné. Chaque fichier **.geo* comporte par défaut le même nom de groupe : « groupe 1 ». Il est impératif de donner un nouveau nom de groupe à chaque fichier **.geo* à partir d'un traitement de texte et de rassembler en suite tous les fichiers **.geo* dans un fichier-mère (*option: copier-coller)*, qui comportera tous les groupes **.geo* et par conséquent la totalité de la géométrie de notre espace. Ainsi le logiciel d'acoustique (Epidaure) pourra distinguer chaque groupe - (ancien calque) en visualisant toute la géométrie de l'espace (Tableau 7.6).

Tableau 7.7

Amphithéâtre de l'école d'Architecture et de Paysage de Bordeaux



a. Structure du modèle surfacique en axonométrie [Kouzeleas, 1997]



b. Perspective intérieure du modèle [Kouzeleas, 1997]

7.2 Calage du modèle de salle sur les mesures par modification des paramètres architecturaux

Ce sous-chapitre concerne une étude de comparaison entre certaines mesures de l'amphithéâtre de l'école d'Architecture et de Paysage de Bordeaux et certains critères objectifs calculés à partir de la même salle modélisée en ajustant les coefficients d'absorption par rapport aux mesures (méthode du « calage de modèle », c.f. chap. 4.3.3) (Tableau 7.7).

Amphithéâtre de l'Ecole d'Architecture et de Paysage de Bordeaux

Carastéristiques de la salle:
Volume : : 2.000m3
Surface : : 340 m2
Nombre de places : 341

Carastéristiques du calcul
Logiciel : Epidaure
Etat du calcul : 2015 rayons (sur 2015)
Ordre de réflexion de 5 … 30
Source no. 1 : Bureau milieu (X = 22.0 ; Y = 14.8 ; Z = 2.5)
Nombre de contributions : 51691
Libre parcours moyen : 4.12 (variance normalisée = 1.04)

(Tableau 7.8)

Calcul : Echogramme
Etat du calcul : 5030 rayons (sur 5030)
Ordre de réflexion : 10
Nombre de récépteurs : 9
Source no. 1 : Bureau milieu (X = 22.0 ; Y = 14.8 ; Z = 2.5)

Résumé des résultats-Récepteur C1

Micro no. 1 : C1

(Tableau 7.9)

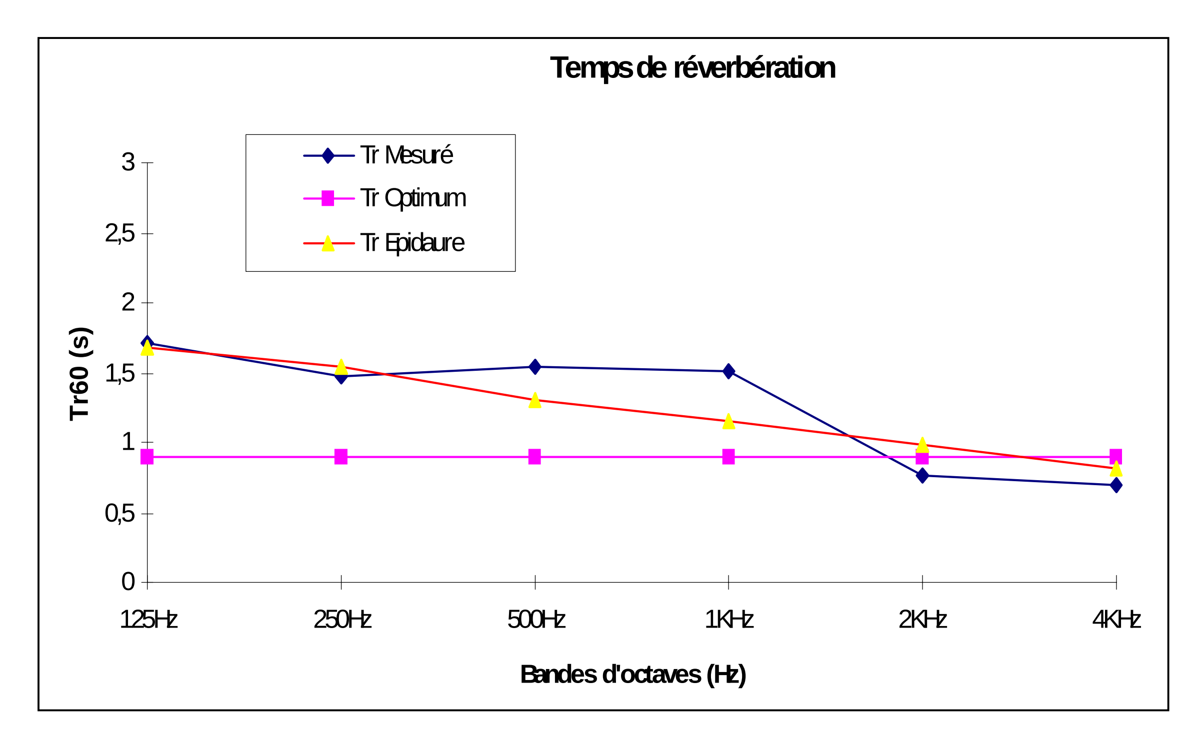
Tableau 7.8

Amphithéâtre de l'école d'Architecture et de Paysage de Bordeaux

Matériaux	125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz
Moquette sur beton	0.080	0.080	0.210	0.260	0.270	0.270
Béton lisse ou peint	0.010	0.010	0.010	0.020	0.050	0.070
Vitrages	0.030	0.040	0.020	0.020	0.020	0.020
Béton	0.010	0.010	0.020	0.020	0.030	0.030
Bois verni	0.050	0.040	0.030	0.030	0.030	0.030
Fauteuil capitonné	0.370	0.370	0.330	0.360	0.400	0.450
Porte pleine	0.110	0.110	0.100	0.090	0.080	0.080
Toile cirée	0.330	0.480	0.260	0.140	0.080	0.110

Abs. De l'air(dB/100m)	0.037	0.121	0.284	0.504	0.999	2.806
Coeff.Absorption moyen	0.099	0.106	0.124	0.140	0.158	0.175

TR Sabine	1.67	1.54	1.31	1.15	0.99	0.82
TR Eyring	1.59	1.46	1.23	1.07	0.91	0.76
TR Statistique(rayons)	1.74	1.61	1.38	1.21	1.05	0.87

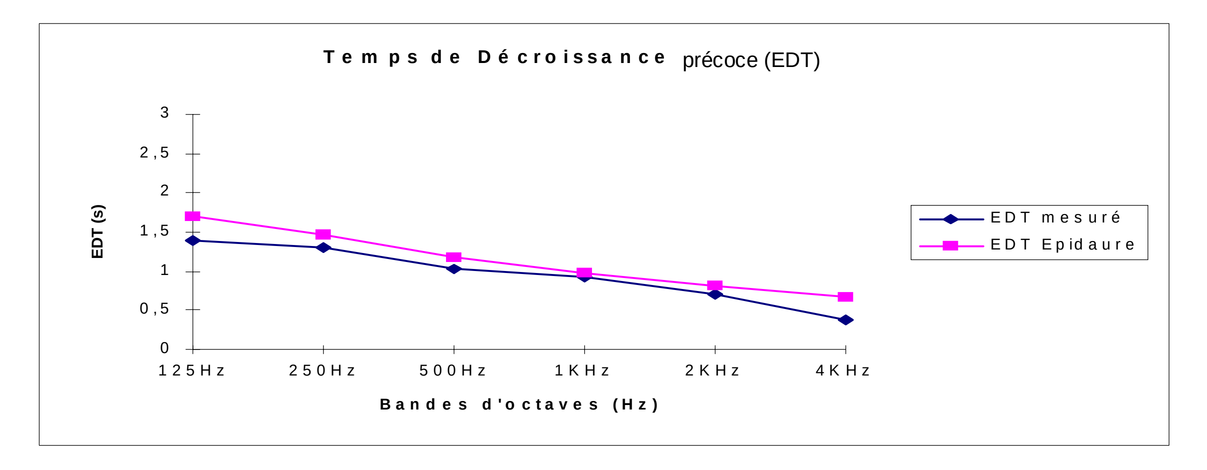


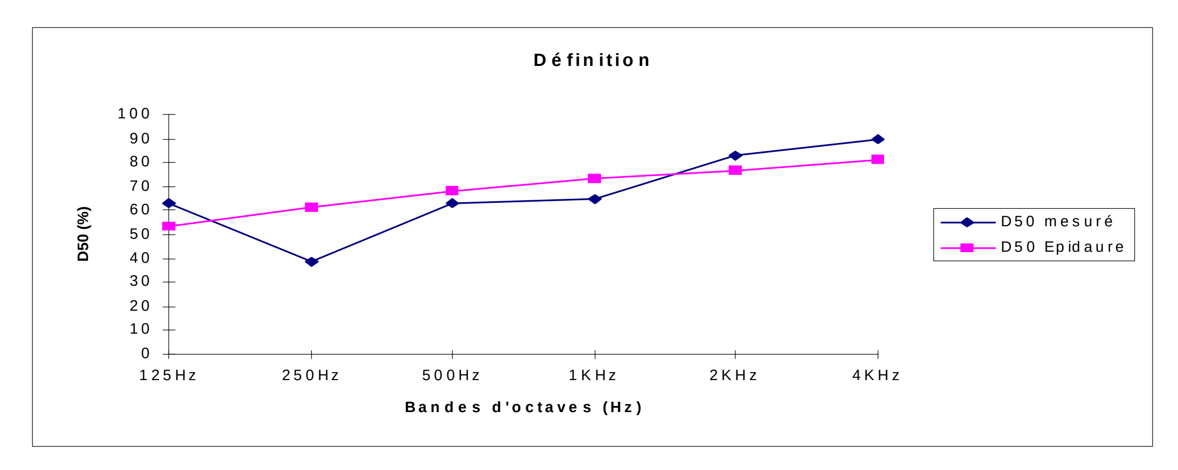
Liste des matériaux et estimation du temps de réverbération [Kouzeleas, 1997]

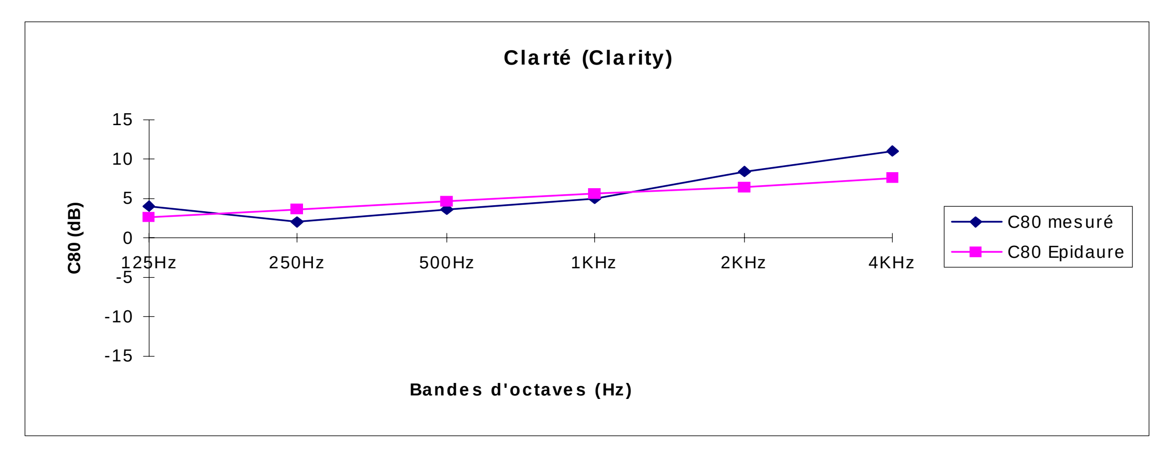
Tableau 7.9

Amphithéâtre de l'Ecole d'Architecture et de Paysage de Bordeaux

Critère	125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz
EDT (s)	1.69	1.47	1.17	0.97	0.82	0.67
D50 (%)	53.37	61.30	68.44	73.39	76.53	81.15
C80 (dB)	2.57	3.61	4.66	5.64	6.34	7.58







Résumé des résultats-Récepteur C1 / Micro no. 1 : C1 [Kouzeleas, 1997]

7.3 Comparaisons de résultats acoustiques

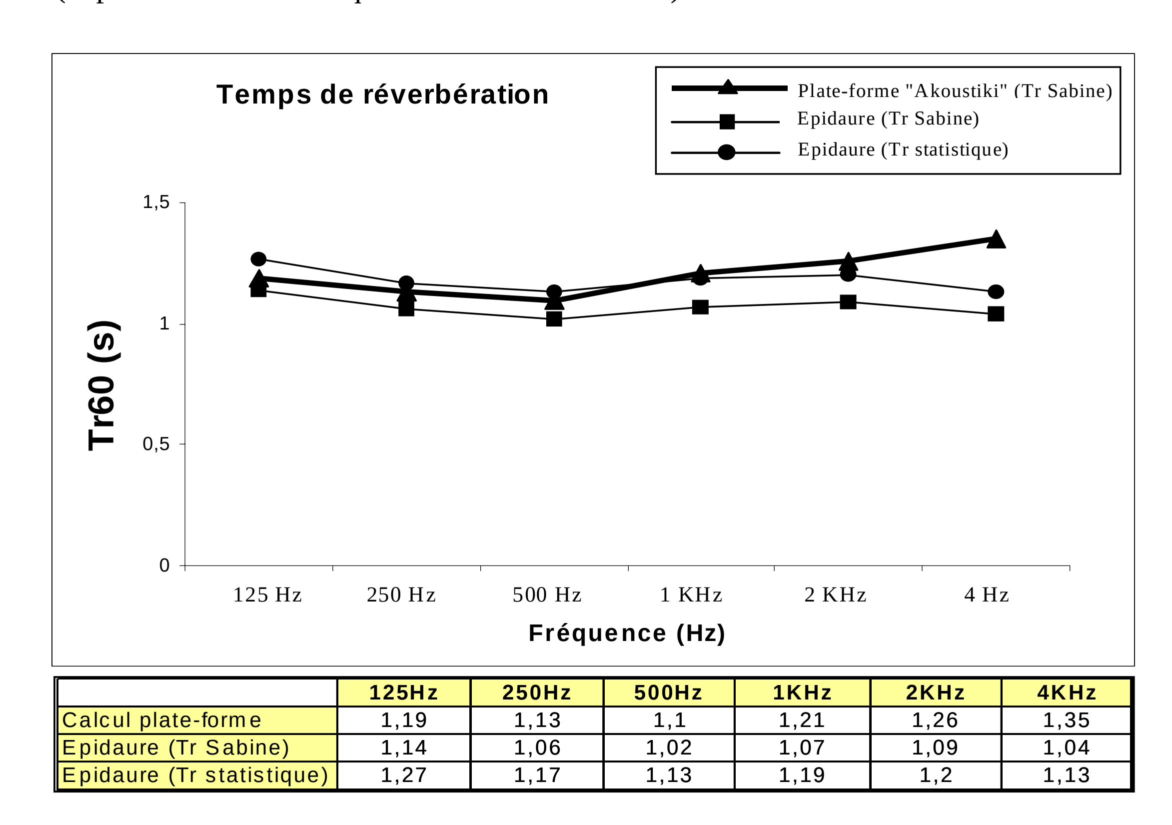
Dans ce chapitre est présentée une étude de comparaison et évaluation du Tr60 Sabine calculé à l’aide de la plate-forme d’aide en simulation acoustique proposée («CAD-Acoustic») avec le Tr60 calculé du logiciel de simulation acoustique Epidaure. La salle utilisée est le modèle informatique simplifié n° 2 (1784 facettes – volume: 5000m3) du Grand Théâtre de Bordeaux (cf. chap. 4.3.4).

Les coefficients d’absorption des matériaux utilisés ont été ajustés par rapport aux mesures selon la méthode du « calage de modèle » (cf. chap. 4.3.3) (fig.20). L’affectation des matériaux à des groupes de surfaces du modèle dans la plate-forme proposée est illustrée sur le Tableau 7.10.

No Mat.	Description Matériau	125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz
1	Revêtement bois avec ornementatio	0,33	0,27	0,24	0,17	0,17	0,14
2	Toile marouflée sur plâtre	0,11	0,09	0,07	0,04	0,04	0,05
3	Béton	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
4	Sièges tissu sur plancher bois	0,15	0,3	0,37	0,43	0,4	0,38
5	Parquet bois collé	0,03	0,04	0,08	0,12	0,12	0,2
6	Verre	0,06	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02
7	Plancher sur lambourdes	0,15	0,1	0,05	0,04	0,04	0,04

Fig. 20 – Matériaux utilisés dans la comparaison des résultats acoustiques (Epidaure / Plate-forme)

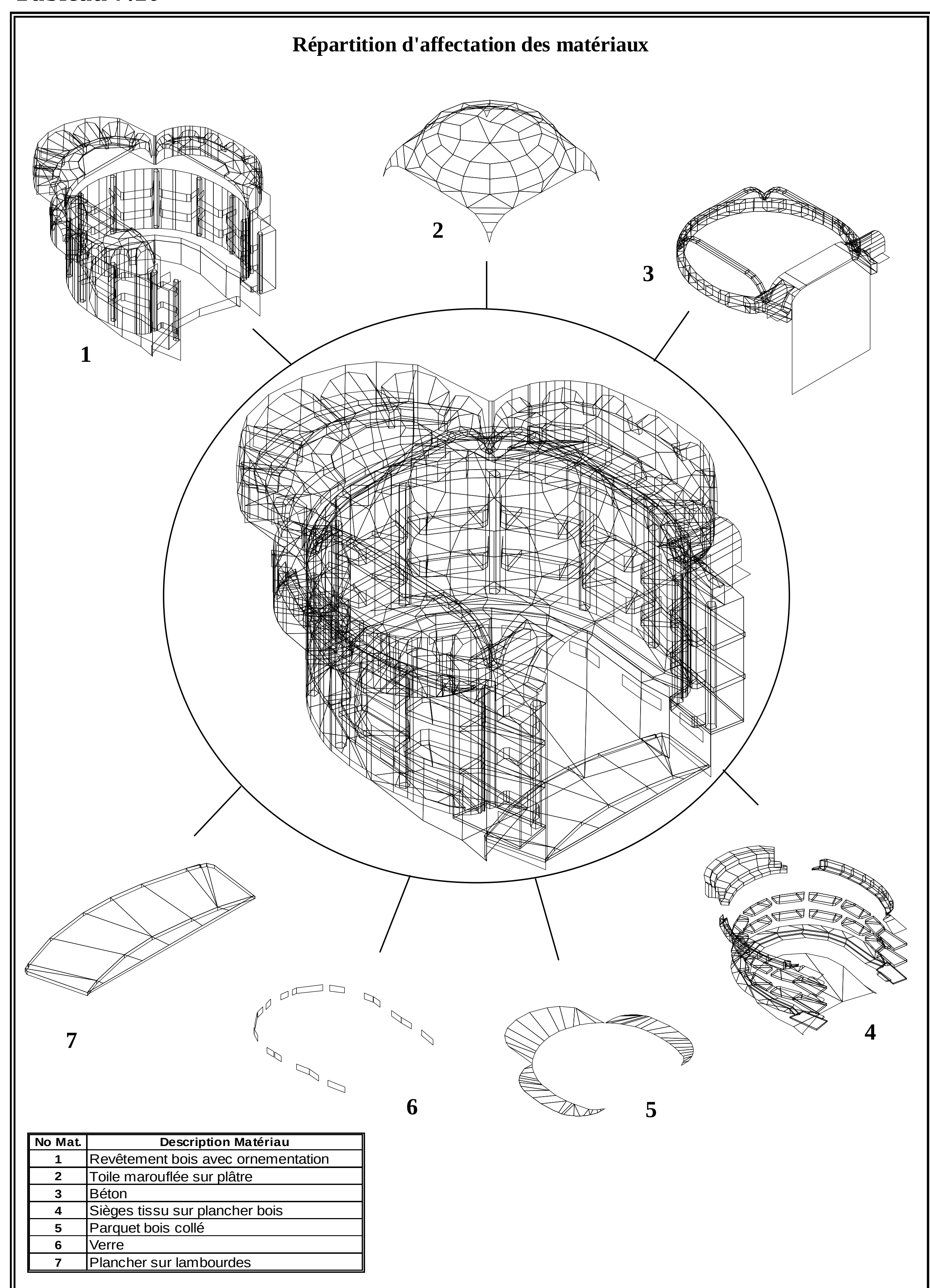
Les résultats du calcul montrent que le Tr Sabine calculé à partir de la plate-forme proposée suit en général les valeurs du calcul d’Epidaure, sauf sur la fréquence de 4 kHz où la valeur est élevée par rapport à celle-ci d’Epidaure. Cela est dû probablement au type de calcul utilisé (expression mathématique Sabine – Tableau 7.1)



	125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz
Calcul plate-forme	1,19	1,13	1,1	1,21	1,26	1,35
Epidaure (Tr Sabine)	1,14	1,06	1,02	1,07	1,09	1,04
Epidaure (Tr statistique)	1,27	1,17	1,13	1,19	1,2	1,13

Fig.21 - Comparaison des résultats du calcul Tr entre « plate-forme CAD-Acoustic» et « Epidaure »

Tableau 7.10

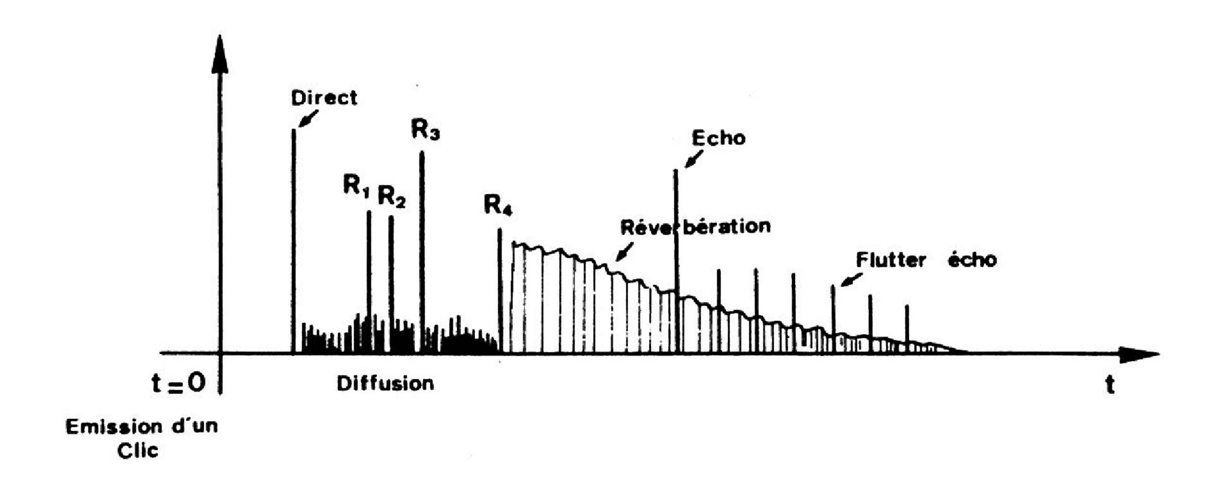


No Mat.	Description Matériau
1	Revêtement bois avec ornementation
2	Toile marouflée sur plâtre
3	Béton
4	Sièges tissu sur plancher bois
5	Parquet bois collé
6	Verre
7	Plancher sur lambourdes

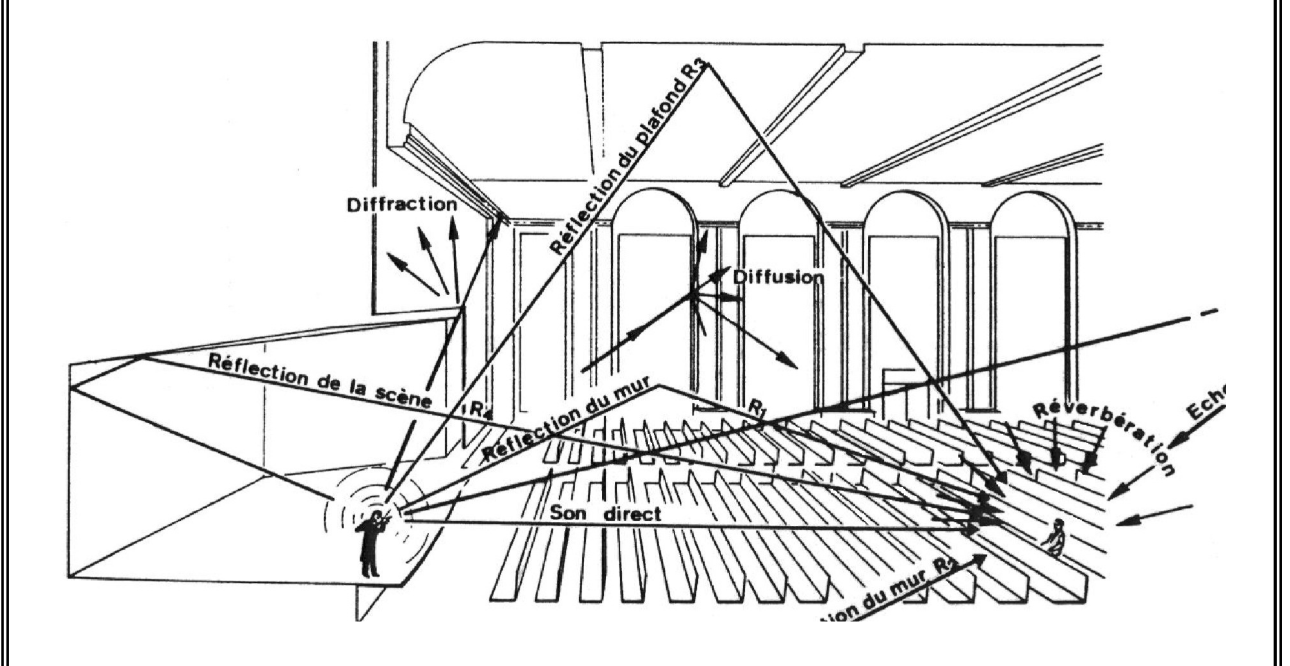
Affectation des matériaux en vue de simulation acoustique sur la plate-forme « CAD-Acoustic ».
Modèle informatique simplifié (1784 facettes - Autocad) du Grand Théâtre de Bordeaux

Tableau 7.10

Echogramme théorique illustrant les phénomènes acoustiques et la définition des critères objectifs calculés à partir de cet échogramme – Chemins de propagation du son



Echogramme (ou réflectogramme) théorique illustrant les phénomènes mentionnés ci-dessous et donnant une image de la réponse impulsionnelle de la salle d'après Beranek [Vian, 1996], (source : [Semidor, 1999])



Chemins de propagation du son dans une salle et principaux phénomènes physiques s'y produisant d'après Beranek [Vian, 1996] (source : [Semidor, 1999])

7.4 Critères objectifs usuels et leurs valeurs optimales

Dans ces Tableaux sont présentées les valeurs optimales des critères objectifs [Semidor, 1999] qui sont prises en compte dans le calcul, l'évaluation et la traduction architecturale des résultats acoustiques dans la plate-forme d'aide en simulation acoustique proposée. Les valeurs optimales du Temps de réverbération sont présentées précédemment à travers un abaque d'optimisation (Tableau 7.3).

Les critères objectifs caractérisent la qualité acoustique d'une salle. Suivant le phénomène physique qu'ils permettent d'analyser, quelques critères objectifs usuels peuvent être classés de la manière suivante [Semidor, 1999] :

- Les critères correspondant à la décroissance temporelle du niveau sonore. Il s'agit des différentes durées du temps de réverbération (Tr60 et EDT),
- Les critères représentant les effets liés aux valeurs des énergies « utile », « nuisible », totale. Tous ces critères sont liés plus ou moins au son direct augmenté des premières réflexions et au champ réverbéré. Il s'agit de l'intelligibilité de la parole (STI et RASTI), de la définition D50 (pourcentage d'énergie « utile » rapportée à l'énergie totale), de la clarté C80 (rapport de l'énergie arrivant dans les 80 ms à l'énergie arrivant après 80 ms), du « rapport signal sur bruit (S/N)» (influence sur la perception de la netteté du son) et du « Temps central (Tc) » (centre de gravité de la réponse impulsionnelle),
- Les critères relatifs à l'impression d'espace et à la localisation des sources. Ces critères sont liés aux réflexions latérales précoces. Il s'agit de l' « efficacité latérale (LE) », de la « fraction d'énergie latérale précoce (LF) » (plus la valeur est grande, meilleure est l'impression d'espace) et de la fonction « IACC » (plus la cohérence IACC entre les signaux est faible, plus précise est la localisation de la source),
- Les critères caractérisant la répartition des niveaux sonores dans l'auditoire. Il s'agit de la « Force sonore (G) » (soit au niveau de la source, soit au niveau de pression pris en chambre anéchoïque à 10 m de la source),
- Les critères concernant la caractérisation du champ sonore sur la scène ou dans la fosse. Il s'agit du « Soutien (ST) » (lié à la proportion d'énergie réfléchie par rapport à l'énergie totale émise et il correspond à la facilité de musiciens à jouer ensemble) et du « EEL (early ensemble level) » (pour mesurer l'efficacité de la transmission des sons directs et précocement réfléchis). Enfin les critères liés au problème de l'écoute dans la fosse et entre la fosse et la scène. Il s'agit du « ST1 (ease for ensemble) » (c'est l' EEL légèrement modifié) et du « ST2 (objective support) » (expression similaire pour remplacer le ST).

Certains de ces critères objectifs sont présentés de manière plus détaillée dans les Tableaux suivants.

Tableau 7.11

Critères objectifs et valeurs optimales

D50 (Définition)
Elle indique le pourcentage d'énergie "utile" rapportée à l'énergie totale en fixant la limite temporelle de discrimination à 50 ms. Son expression mathématique est :

$$D50 = \frac{\int_0^{50ms} h^2(t)\,dt}{\int_0^{\infty} h^2(t)\,dt} \quad \text{en } \%$$

D50	*0 à 30%*	*30% à 45%*	*45% à 60%*	*60% à 75%*	*75% à 100%*
Définition	*Mauvaise*	*Pauvre*	*Moyenne*	*Bonne*	*Excellente*

C80 (Clarté)
Critère utilisé pour les messages parlés mais plus adapté à la musique et défini comme le rapport de l'énergie arrivant dans les 80 ms (directe et précoce) à l'énergie tardive (après 80 ms). Son expression mathématique est :

$$C80 = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} h^2(t)\,dt}{\int_{80ms}^{\infty} h^2(t)\,dt} \quad \text{en dB}$$

C80	Tolérance
Musique	-3 dB à +3 dB
Messages parlés	+3 dB à +10 dB

STI ou RASTI (Intelligibilité de la parole)
Pour mesurer l'intelligibilité de la parole on déduit la moyenne des valeurs en dB des rapports "signal sur bruit", sur les bandes de fréquences allant de 125 à 8000 Hz pour le Speech Transmission Index (STI) ou sur 500 et 2000 Hz pour le Rapid Speech Transmission Index (RASTI), de la variation de la fonction de transfert de modulation m(f) dérivant de la réponse impulsionnelle h(t) :

$$m(f) = \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) * e^{2\pi jft}\,dt}{\int_0^{\infty} h^2(t)\,dt}$$

STI ou RASTI	*0 à 0,30*	*0,30 à 0,45*	*0,45 à 0,60*	*0,60 à 0,75*	*0,75 à 1*
Intelligibilité	*Mauvaise*	*Pauvre*	*Moyenne*	*Bonne*	*Excellente*

[Semidor, 1999]

Tableau 7.12

Critères objectifs et valeurs optimales

Tc (Temps central)
Il est basé sur la fonction de décroissance du signal sonore et il correspond au centre de gravité de la réponse impulsionnelle. Son expression mathématique est :

$$Tc = \frac{\int_0^\infty t * h^2(t)\,dt}{\int_0^\infty h^2(t)\,dt} \quad \text{en ms}$$

Tc	Tolérance
Musique	50 ms à 250 ms
Parole	0 ms à 50 ms

S/N (Rapport Signal sur Bruit)
Il caractérise l'émergence du signal par rapport à la réverbération. Son expression mathématique est :

$$S/N = 10 \log \frac{\int_0^{95ms} a(t) * h^2(t)\,dt}{\int_{95ms}^\infty h^2(t)\,dt} \quad \text{en dB}$$

où a(t) : terme de pondération qui régularise la répartition temporelle de l'énergie :

$$a(t) = \begin{cases} 1 \\ 1 - \frac{1}{60}(t-95) \\ 0 \end{cases}$$

Plus sa valeur est élevée positivement, plus la netteté du message est assurée

G (Force sonore)
Elle correspond au niveau sonore relatif :
- soit au niveau de puissance de la source Lw d'où : G=Lp – Lw en dB

G	Valeurs optimales de seuil
Sources faibles	de -20 dB
Sources puissantes	à –35 dB

- soit au niveau de pression pris en chambre anéchoïque à 10m de la source La :

$$G = 10 \log \frac{\int_{t1}^{t2} p^2(t)\,dt}{\int_{t1}^{t2} p_a^2(t)\,dt} \quad \text{en dB}$$

Expression équivalente à la première uniquement avec des sources omnidirectionnelles pour lesquelles La = Lw – 31 dB.

La variation de force sonore entre les différentes places dans l'auditoire ne doit pas dépasser 5 dB

[Semidor, 1999]

7.5 Exemples d’expressions mathématiques et algorithmes utilisés dans les programmes informatiques

Dans ce chapitre sont présentées quelques algorithmes, expressions mathématiques et géométriques utilisées dans le code de programmation concernant des aspects différents de la plate-forme d’aide en simulation acoustique « CAD-Acoustic » (étude géométrique, étude statistique, calcul des critères objectifs, etc...).

La plate-forme proposée est entièrement développée en Visual BASIC et Visual LISP. Il s’agit d’un rassemblement de plusieurs « formes » (boites de dialogue autonomes liées à leurs propres codes de programmation Visual BASIC) qui contient des liaisons avec des routines de calcul (en visual LISP et DCL), des onglets et des différents boutons (Tableau 7.13).

Dans l’approche géométrique de la composante « Pédagogie » et l’étude géométrique de la composante « Calcul » de la plate-forme un certain nombre des expressions mathématiques transformées en algorithmes informatiques est absolument nécessaire pour assurer différents calculs de visualisation, de lancement et réflexion des rayons, de traitement des surfaces, des axes, etc.., qui aboutissent au calcul des critères objectifs. Certains exemples de base présentés ici concernent :

- Expression mathématique du calcul d'intersection d'un rayon avec un plan (Tableau 7.14)
- Algorithme de vérification de l’existence du point d’intersection d’un rayon avec une surface à l’intérieur ou à l’extérieur de la surface définie (Tableau 7.15)
- Expression mathématique du calcul de la normale d'un plan défini (Tableau 7.16)
- Algorithme de définition d'un angle d'élévation par rapport au plan xy et code de programmation d'un point en fonction de la position d'un autre point (Tableau 7.17)
- Expression mathématique et algorithme de définition de la distance d'un plan à un point (Tableau 7.18).

Ces exemples de base mathématiques et informatiques sont très significatifs de l’importance de ces fonctions dans le calcul acoustique. Ils font partie d’un nombre considérable des fonctions minimales qui structurent tous les calculs dans la plate-forme. Chaque fonction aboutit à un résultat qui peut être en lui-même un objectif de calcul important. L’intégration et l’accès par l’intermédiaire de la plate-forme au résultat de chaque fonction feront partie de la suite des recherches déjà effectuées. Un récapitulatif des fonctions informatiques minimales développées, est présenté dans les Tableaux 7.19 jusqu’au 7.23 à la fin de ce chapitre.

Tableau 7.13

Extrait du code de programmation en Visual BASIC de la plate-forme d'aide en simulation acoustique

```
Private Sub UserForm_Initialize()
' ListBox6 - Type de salle
ListBox6.AddItem ("Orgue")
ListBox6.AddItem ("Musique symphonique")
ListBox6.AddItem ("Opéra")
ListBox6.AddItem ("Jazz et chambre")
ListBox6.AddItem ("Parole")
ListBox6.AddItem ("Variétés")
…
TextBox_analyse_detaillee.MultiLine = True
' TextBox1.AutoSize = True
TextBox_analyse_detaillee.EnterKeyBehavior = True
TextBox_analyse_detaillee.Locked = True
TextBox_analyse_detaillee.ScrollBars = fmScrollBarsVertical
…
End Sub
…
Private Sub excel_Click()
Form_ CAD-Acoustic.Hide
ThisDrawing.SendCommand "excel1 "
ThisDrawing.SendCommand "-vbarun D:\stelios\data\these\vba\ CAD-Acoustic.dvb!Module_CAD-
Acoustic. CAD-Acoustic "
End Sub
…
Private Sub salles_consultation_Click()
Form_ CAD-Acoustic.Hide
salle.Show
Form_ CAD-Acoustic.Show
End Sub
…
' Apprentissage statistique
Private Sub ListBox5_DblClick(ByVal Cancel As MSForms.ReturnBoolean)
If ListBox5.Selected(0) = True Then
' Analyse
TextBox_tr.Visible = True
TextBox_vide.Visible = False
TextBox_edt.Visible = False
TextBox_d50.Visible = False
TextBox_c80.Visible = False
TextBox_tr.MultiLine = True
TextBox_tr.EnterKeyBehavior = True
TextBox_tr.Locked = True
TextBox_tr.ScrollBars = fmScrollBarsVertical
End If
…
End Sub
…
Private Sub SpinButton1_Change()
SpinButton1.Min = 0
SpinButton1.Max = 1000
TextBox5.Value = SpinButton1.Value * 50
End Sub
…
```

Tableau 7.14

Expression mathématique du calcul d'intersection d'un rayon avec un plan

Ce calcul est primordial pour la visualisation des réflexions des rayons sonores [Whitted, 1980], du principe du lancer de rayon [Appel, 1968] et du calcul de certains critères objectifs basé sur la méthode des moindres carrés en utilisant la courbe de décroissance de l'énergie (EDC). Ce calcul d'intersection repose sur la représentation paramétrique des vecteurs [Foley, 1995], [Haines, 1989], [Kajiya, 1982].

Tout point (x,y,z) situé sur la droite définie par (x_o, y_o, z_o) *et (x1, y1,z1) est définie par une variable t telle que:*

$$x = x_o + t * (x1 - x_o), \quad y = y_o + t * (y1 - y_o), \quad z = z_o + t * (z1 - z_o) \qquad (1)$$

Pour simplification:

$$\Delta x = x1 - x_o, \quad \Delta y = y1 - y_o, \quad \Delta z = z1 - z_o \qquad (2)$$

Des (1) et (2) =>

$$x = x_o + t * \Delta x, \quad y = y_o + t * \Delta y, \quad z = z_o + t * \Delta z \qquad (3)$$

Le équation du plan étant:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \qquad (4)$$

où (A, B, C) : les vecteurs de la normale du plan

Des (3) et (4) =>

$$A * (x_o + t * \Delta x) + B * (y_o + t * \Delta y) + C * (z_o + t * \Delta z) + D = 0,$$

$$=> \quad t * (A*\Delta x + B*\Delta y + C*\Delta z) + (A*x_o + B*y_o + C*z_o + D) = 0,$$

$$=> \quad t = \frac{(A*x_o + B*y_o + C*z_o + D)}{(A*\Delta x + B*\Delta y + C*\Delta z)} \qquad (5)$$

<u>Nota:</u>
Si le dénominateur $(A*\Delta x + B*\Delta y + C*\Delta z)$ *est nul, il n'y a pas d'intersection.*
En cas d'intersection, une vérification très importante consiste à déterminer si le point d'intersection est à l'intérieur de la surface définie ou non (Tableau 7-10).

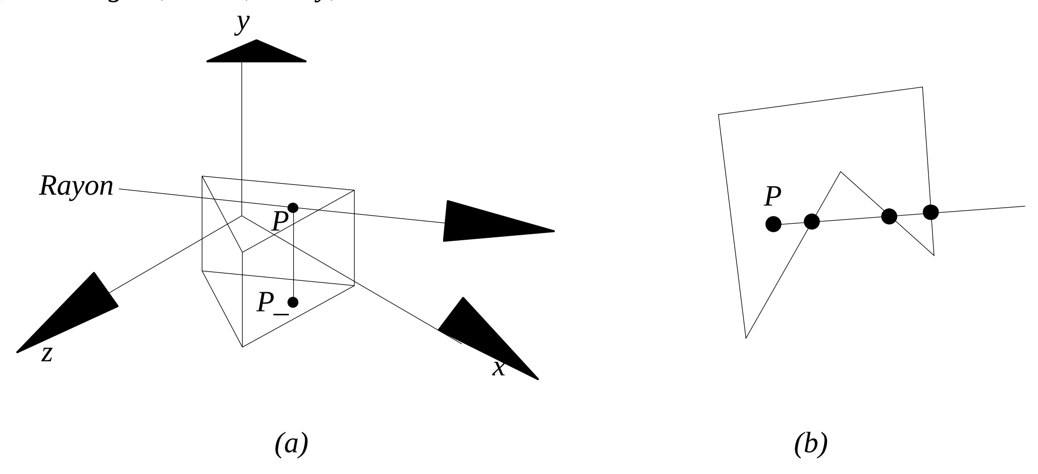
Dans le code de programmation pour le calcul d'intersection on définit le vecteur de la normale et la direction du vecteur du rayon :

Direction du vecteur du rayon dirigée vers la surface => Valeur absolue de la variable "t",
Direction du vecteur du rayon non dirigée vers la surface => Valeur vrai (calculée) de la variable "t".

Tableau 7.15

Algorithme de vérification de l'existence du point d'intersection d'un rayon avec une surface à l'intérieur ou à l'extérieur de la surface définie

Ce calcul est lié au calcul de l'intersection d'un rayon avec un plan. Suite du calcul de l'intersection il est important de vérifier si le point d'intersection du rayon avec le plan de la surface appartient à l'intérieur des sommets de la surface ou non afin de déterminer une intersection d'un rayon avec une surface bien définie. Cette vérification consiste à projeter la surface et le point perpendiculairement sur l'un des trois plans de projection du système de coordonnées. On teste alors l'inclusion du point projeté dans la surface projetée (a) (b).[Harrington, 1995],[Foley, 1995].



(a) *(b)*

<u>*; Projection d'un point sur le plan xz*</u>
(defun Y_PROJ (… / …) Routine de projection d'un point sur le plan xz

<u>*; Vérification du point d'intersection à l'intérieur ou à l'extérieur de la surface*</u>
(defun XZ_INOUT (… / …) Déclarer les variables de la routine
(setq p (y_proj point)) Projeter le point d'intersection sur le plan xz
(setq p_ (polar …) Définir un 2me point sur le plan xz pour tracer une ligne infinie du point d'intersection projeté sur un plan afin de vérifier ses points d'intersection avec les arrêtes de la surface.
(foreach … Pour chaque coordonnée de la surface, projeter sur le plan xz tous les sommets de cette surface.
(setq nombre final de point d'intersection A) Déclarer une liste contenant tous les points d'intersection A (de la ligne infinie avec les arrêtes de le surface projetée)
(foreach … Pour chaque point d'intersection A
    (If intersection A = nul ,alors
        (setq nombre final (1+ nombre final) Procéder au point suivant,
            (Sinon, if final de point d'intersection A = impair, ou point d'intersection A est sur l'arrête de la surface,
                alors, "Le point est à l'intérieur de la surface"

             if final de point d'intersection A = pair ,
                alors, "Le point est à l'extérieur de la surface"
)
)
)
)

Algorithme de vérification d'un point à l'intérieur ou l'extérieur d'une surface par le nombre impair ou pair des intersections d'une ligne du point à examiner avec les arrêtes de la surface (Visual LISP)

Tableau 7.16

Expression mathématique du calcul de la normale d'un plan défini

Le calcul de la normale est nécessaire pour un certain nombre des opérations de modélisation (ex: ajustement des faces des surfaces en vue de simulation acoustique etc...), des opérations de calcul géométrique (ex: calcul d'intersection, transformations géométriques 3D etc...) et des opérations de visualisation (ex: affectation des matériaux, application des modèles d'ombrage aux différentes faces etc.).
Le calcul de la normale passe par d'autres calculs préalables comme le calcul des vecteurs [Dony, 2000] des déterminants pour aboutir au calcul du produit vectoriel qui correspond à la normale [Foley, 1995], [Thuizat, 2000].

Le déterminant d'une matrice n X n est défini en fonction des déterminants de matrices de taille inférieure. Si on note A1i le déterminant de la matrice (n-1) X (n – 1) obtenue en supprimant la première ligne et la i-ème colonne de la matrice A de taille n X n, le déterminant de A est défini par:

$$\det A = \sum_{i=1}^{n} (-1)^{1+i} \, a1i * A1i$$

Le produit vectoriel est une application du calcul de déterminant en 3D. On calcule le produit vectoriel de deux vecteurs :

$$v = \begin{bmatrix} v1 \\ v2 \\ v3 \end{bmatrix} \quad et \quad w = \begin{bmatrix} w1 \\ w2 \\ w3 \end{bmatrix}$$

en calculant le déterminant de la matrice :

$$v = \begin{bmatrix} i & j & k \\ v1 & v2 & v3 \\ w1 & w2 & w3 \end{bmatrix},$$

*dans laquelle les lettres i, j, et k représentent les vecteurs unitaires dans les directions des trois axes. Le résultat, noté v*w, est donc une combinaison linéaire des vecteurs i, j, et k, égale au vecteur :*

$$\begin{bmatrix} v2*w3 - v3*w2 \\ v3*w1 - v1*w3 \\ v1*w2 - v2*w1 \end{bmatrix}$$

Le produit vectoriel de v et w correspond à la normale du plan,il est perpendiculaire au plan défini par v et w et sa longueur est égale au produit || v|| ||w|| |sinθ|, où θ est l'angle compris entre v et w [Foley, 1995].

Tableau 7.17

Algorithme de définition d'un angle d'élévation par rapport au plan xy et code de programmation d'un point en fonction de la position d'un autre point

Le calcul de la définition de l'angle "élévation" (angle d'un point par rapport au plan xy) et le calcul de la définition d'un point en 3D en fonction de la position d'un autre point, de leur distance et de leurs angles (azimut et élévation), ce sont des calculs qui servent à un certain nombre des opérations géométriques dans le cadre de la simulation acoustique. Ces calculs sont utilisés entre autre dans le lancement et les réflexions des rayons sonores et dans la visualisation des normales.

```
(defun 3dangle ( … / …)  Déclarer les variables de la routine
(setq p1 … ) ; Projection du p1 sur le plan xy
(setq p2 … ) ; Projection du p2 sur le plan xy
 (setq ang3d  (atan a b …) ; Détermination à l'aide de l'Arctangente de l'angle du
triangle rectangle dont les deux cotés de l'angle sont connus : (a: différence des
coordonnées z des p1 et p2 et b: distance entre p1 et p2).
Ang3d  ; Renvoi de la fonction
)
```

a. Algorithme (VisualLISP) de la définition de l'angle "élévation" d'un point par rapport au plan xy

```
(defun 3dpolar (P1 auxy avecxy dist)
   (if (> avecxy (* 2 PI))  (setq avecxy (rem avecxy (* 2 PI)))  )
  (if (> auxy (* 2 PI))  (setq auxy (rem auxy (* 2 PI)))   )
  (if (> (abs avecxy) PI)  (setq avecxy (if (minusp avecxy)
                                  (+ (* 2 PI) avecxy)  (- avecxy (* 2 PI))
                            )
                        )
  )
 (if (> (abs avecxy) (/ PI 2))  (setq auxy (rem (+ PI auxy) (* 2 PI))
                                  avecxy (rem avecxy (/ PI 2))
                            )
  )
 (list                 (+ (car P1)   (* (cos auxy) (cos avecxy) dist) )
           (+ (cadr P1)  (* (cos avecxy) (sin auxy) dist) )
           (+ (caddr P1) (* (sin avecxy) dist) )
  )
)
```

b. Code de programmation (VisualLISP) de définition d'un point 3D en fonction de la position, distance et des angles (azimut et élévation) d'un autre point

Tableau 7.18

Expression mathématique et algorithme de définition de la distance d'un plan à un point

Le calcul de la distance d'un plan à un point [Vissio, 2000] est important dans le cadre du calcul de simulation acoustique. Il sert entre autre au calcul d'intersection d'un rayon avec un plan ainsi qu' à l'identification des distances entre matériaux et éléments acoustiques afin d'optimiser leurs positions.

Soit p le plan d'équation:

$$u*x + v*y + w*z + h = 0$$

dans un repère orthonormé $(O; \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$,

et $\vec{OI}$ *le vecteur* $\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$ *orthogonal à p,*

La distance du plan p : ux+vy+wz+h=0 au point M (x,y,z) est :

$$d\,(P,M) = \frac{|ux + vy + wz + h|}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}}$$

a. Expression mathématique de la distance d'un plan à un point

```
(defun 3ddistance  ( … / …)  Déclarer les variables de la routine
(setq normal …) ; Définition de la normale (A B C) de la surface sélectionnée
(setq p2 (list …)   ; Définition du P2 (x=Xo + k*A , y= Yo + k*B, z= Zo + k*C ) de la ligne P1_P2
verticale à la surface (où  p1 (Xo Yo Zo) = point projeté sur la surface) – Si direction de P1_P2 =
direction de la normale, alors x= x=Xo + k*A, sinon x= Xo-k*A
(setq ang_avecxy (3dangle p1 p2)) ; Définition de l'angle par rapport au plan xy des points P1 et P2

(setq ang_auxy (angle p1 p2))     ; Définition de l'angle dans le plan xy des points P1 et P2
(setq p1_face (…) ; Définition d'un point de la surface
 (setq D (…) ; Définition du D de l'expression du plan  |A*Xo+B*Yo+C*Zo+D|

(setq dist1 (abs (…) ; Définition du nominateur de l'équation de la distance d'un plan à un point

(setq dist2 (…)        ; Définition du dénominateur de l'équation de la distance d'un plan à un point

(setq dist (/ dist1 dist2)) ; ; Définition de la distance
dist       ; Renvoi de la distance
)
```

b. Algorithme (VisualLISP) de la distance d'un plan à un point

Tableau 7.19

No	Nom de fonction	Résultat
	Récapitulatif des fonctions minimales informatiques développées au service de la plate-forme d'aide en simulation acoustique	
1	**(3DANGLE p1 p2)**	Elle renvoie l'angle par rapport au plan xy (avecxy) entre les points p1 et p2 dans l'espace 3D.
2	**(3DPOLAR p1 auxy avecxy dist)**	Elle renvoie un point p2 qui fait par rapport au point p1, un angle « auxy » sur le plan xy, un angle « avecxy » par rapport au plan xy et une dist=p1 p2.
3	**(3DDISTANCE liste_ent p1)**	Elle renvoie la distance projetée d'un point par rapport un plan
4	**(DERA angle)**	Elle transforme l'angle de degrés en radians (de -> ra)
5	**(RADE angle)**	Elle transforme l'angle de radians en degrés (ra -> de)
6	**(XY_INOUT liste_ent point)**	Elle vérifie si un point est à l'intérieur d'une surface de 4 arêtes projetée sur le plan xy (z=0). (renvoie "in") ou bien à l'extérieur (renvoie "out").
7	**(YZ_INOUT liste_ent point)**	Elle vérifie si un point est à l'intérieur d'une surface de 4 arêtes projetée sur le plan yz (x=0). (renvoie "in") ou bien à l'extérieur (renvoie "out").
8	**(XZ_INOUT liste_ent point)**	Elle vérifie si un point est à l'intérieur d'une surface de 4 arêtes projetée sur le plan xy (y=0). (renvoie "in") ou bien à l'extérieur (renvoie "out").
9	**(MULT_aXcol a col)**	Multiplication matricielle de a (matrice M * N) par col (matrice colonne) [nombre de colonnes en a = nombre de rangées en col]
10	**(MULT_aXb a b)**	Multiplication matricielle de a(matrice M X N) par b(matrice N X M) [nombre de colonnes en a = nombre de rangées en b]
11	**(REN_A a)**	Elle renvoie la matrice inverse de la matrice a
12	**(ADD_A+B a b)**	Addition de 2 matrices de la même taille.
13	**(SUB_A-B a b)**	Soustraction de 2 matrices de la même taille.
14	**(VECTOR p1 p2)**	Elle renvoie en liste le vecteur p1_p2 des 2 points.
15	**(NORMALE liste_ent)**	Elle renvoie la normale (en liste) d'une surface planaire 3dface
16	**(NORMALE1 p1 p2 p3)**	Elle renvoie la normale (en liste) n'importe quel plan planaire défini par 3 points.
17	**(3DINTERS liste_ent p1 p2)**	Elle renvoie du point d'intersection d'une ligne (dont 2 points p1 p2) avec une 3dface
18	**(P_PROJ liste_ent p1)**	Elle renvoie le point projeté d'un point sur une surface (plan) sélectionnée.
19	**(X_PROJ p1)**	Elle renvoie le point projeté d'un point sur le plan YZ.
20	**(Y_PROJ p1)**	Elle renvoie le point projeté d'un point sur le plan XZ.

Tableau 7.20

Récapitulatif des fonctions minimales informatiques développées au service de la plate-forme d'aide en simulation acoustique (…suite)		
No	**Nom de fonction**	**Résultat**
20	**(Y_PROJ p1)**	Elle renvoie le point projeté d'un point sur le plan XZ.
21	**(Z_PROJ p1)**	Elle renvoie le point projeté d'un point sur le plan XY.
22	**(XY liste_ent point)**	Elle renvoie une liste ("in" "out" "in" etc.) du calcul « inout » en projection d'une 3dface sur le plan xy
23	**(YZ liste_ent point)**	Elle renvoie une liste ("in" "out" "in" etc.) du calcul « inout » en projection d'une 3dface sur le plan yz
24	**(XZ liste_ent point)**	Elle renvoie une liste ("in" "out" "in" etc.) du calcul « inout » en projection d'une 3dface sur le plan xz
25	**(XYZ liste_ent point)**	Elle renvoie une liste ("in" "out" "in" etc.) du calcul « inout » en projection parallèle d'une 3dface sur le plan xy-yz-xz en même temps.
26	**(VR liste_ent p1 p2)**	A partir d une surface (liste_ent) et une ligne1 de 2 points (p1 p2) , elle renvoie une liste de 2 points de la ligne2 de réflexion
27	**(REFL p1 p2)**	Elle renvoie la liste = (inters point1_ligne_refl point2_ligne_refl) de la ligne de réflexion en cherchant sur tous les 3dfaces et en même temps elle enregistre dans une variable locale les coordonnées de 4 sommets de la 3dface a laquelle s'intersectionne le 1er rayon et elle crée la liste globale "SOMMETS". Note : pour sélectionner toutes les 3dfaces, elles doivent être actives et visibles (pas de calque gelé).
28	**(SUR p1 p2 point)**	Elle renvoie "In" si le "point" se trouve sur la ligne faite par les points p1 p2, ou bien "Out" si le "point" n'est pas sur la ligne p1_p2
29	**(COMPTEUR_DATA dat)**	Elle renvoie le nombre des lignes sur n'importe quel fichier de données (« data »).
30	**(REFL_TOUT source-p1 p2 ordre-refl)**	Elle trouve tous les points d'intersection du parcours d'un rayon a travers des 3dfaces et elle les récupère dans une liste globale "ALL_INTERSECTIONS" et en même temps elle additionne (fonction « (refl) ») dans une liste global e "SOMMETS" les coordonnées de 4 sommets de CHAQUE 3dface (alors toutes) à laquelle s'intersectionne un SEUL rayon lancé.

Tableau 7.21

Récapitulatif des fonctions minimales informatiques développées au service de la plate-forme d'aide en simulation acoustique (…suite)

No	Nom de fonction	Résultat
31	**(COEF_TOUTES_FREQUENCES sommets_plus_coef sommets)**	Elle renvoie une liste avec tous les coeff. d'absor. (en bande Hz) en ordre selon l'ordre des 3dfaces frappées par le rayon. Elle crée la variable globale : "COEF_ALL_FREQUENCES".
32	**(ENERGIE p2 ordre energie_initiale)**	Elle calcule l'énergie arrivée de chaque réflexion D'UN RAYON par rapport au temps « t » précis..
33	**(TEMPS t ener)**	Elle crée une liste globale TOUTES_ENERGIES en mettant toutes les énergies des réflexions arrivant un temps « t » précis au récepteur.
34	**(c: LISTE_EDC)**	Elle trouve en liste la somme de toutes les énergies arrivées et en même temps renvoie en liste ou bien en fichier (au choix) l'énergie de chaque case du tableau EDC (« Early Decay Time) » par rapport au temps précis. A partir de cette liste EDC on calcule après les critères objectifs
35	**(PHI_THETA x y)**	Elle renvoie une liste des angles en radians phi (auxy) et theta (avecxy) du tirage des rayons , si on connaît les valeurs x et y (entre 0-1) à chaque fois.
36	**(c:TIRAGE)**	Elle effectue un tirage des x et y entre 0-1 de manière uniforme pour repartir les rayons en suite dans l'espace de manière aussi uniforme.
37	**(c:SAISIR_COEF)**	Elle enregistre les cordonnées des 4 points de la 3dface sélectionnée (sélection massive par couleur ou calque) + la valeur d'absorption affectée à chaque surface de façon individuelle ou collective et elle renvoie une liste avec tous les coeff. d'absor. en ordre selon l'ordre des 3dfaces frappées par le rayon. Cette liste est utilisée pour trouver l'énergie d'un rayon qui frappe sur des 3dfaces.
38	**(c:ENER_DAT)**	Elle calcule l' énergie d'une intervalle temps (ex 0-5ms etc.)
39	**(c:ENER_ALL)**	Elle calcule et enregistre l'énergie totale (somme de toutes les énergies)
40	**(c:SAISIR_BASE)**	Elle enregistre les coordonnées des points de la source et du récepteur défini et elle crée les paramètres globaux "source_sonore" et "recepteur1"
41	**(RCONS)**	Fonction inverse de (cons) -> rajoute un élément (atome=non liste) à la fin d'une liste et non au début comme (cons).

Tableau 7.22

Récapitulatif des fonctions minimales informatiques développées au service de la plate-forme d'aide en simulation acoustique (…suite)

No	Nom de fonction	Résultat
42	**(c:INITIALISATION_TOUT)**	Créer une liste globale pour accueillir toutes les énergies en intervalle de temps par 5ms. En même temps elle initialise et met à jour (vide) toutes les autres variables globales participant au calcul acoustique.
43	**(INITIALISATION)**	Elle initialise et met à jour un certain nombre des variables globales (sommets, toutes les intersection des réflexions et tous les coefficients d'absorption)
44	**(INIT_TOUTES ENERGIES)**	Elle initialise la liste globale contenant toutes les énergies des réflexions
45	**(c:TR)**	Elle renvoi le TR60 (variable globale)
46	**(c:GRAPHIQUES_EXCEL)**	Exemple sur visualisation des groupes de critères objectifs sous forme "graphique radar" sur Excel
47	**(c:SAISIR_HU_TE)**	Elle permet de saisir l'humidité et la température (pour le calcul de l'atténuation de l'air, du Tr etc.)
48	**(3DDISTANCE1 point p_1 p_2 p_3)**	Elle calcule la distance d'un point à une surface définie par 3 points.
49	**(c:3DSURFACE)**	Intersection de deux surfaces
50	**(c:AIRE3D_TOTAL)**	Elle calcule la superficie totale des surfaces du modèle
51	**(c :VIEW_NORMALE)**	Elle crée la normale d'une surface
52	**(c :INVERSER_NORMALE)**	Elle inverse la direction de la normale d'une surface
53	**(c :AJUSTER_NORMALES)**	En choisissant un point a l'intérieur de la salle elle tourne toutes les normales vers l'intérieur de la salle.
54	**(c:HTML)**	Elle lance et visualise une présentation en format « html ».
55	**(c:WORD1)**	Elle lance et visualise une présentation en format reconnu par l'application « word »
56	**(c:POWERPOINT1)**	Elle lance et visualise une présentation en format « powerpoint »
57	**(c:EXCEL1)**	Elle lance et visualise une présentation en format reconnu par l'application « excel »
58	**(c:IMAGE1)**	Elle lance et visualise une présentation en format image.

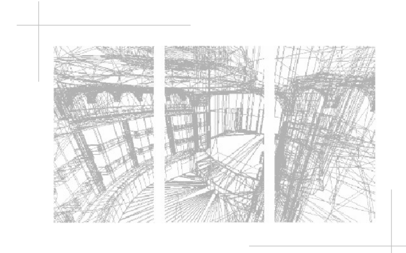
Tableau 7.23

Récapitulatif des fonctions minimales informatiques développées au service de la plate-forme d'aide en simulation acoustique (…suite)

No	Nom de fonction	Résultat
59	**(c:SON1)**	Elle lance l'application « sound recorder » de windows pour écouter le fichier de format « .wav » défini.
60	**(c:CO_SALLE)**	Elle calcule avec évaluation et traduction architecturale un critère objectif d'une salle.
61	**(c:CO_SALLES)**	Evaluation et traduction architecturale d'un critère objectif de plusieurs salles.
62	**(c:COS_SALLE)**	Elle calcule avec évaluation et traduction architecturale de plusieurs critères objectifs d'une salle.
63	**(c :HP)**	Elle dessine une ligne d'aide infinie en passant par un point défini.
64	**(c :HPP)**	Elle dessine une ligne d'aide infinie en passant par deux points définis.
65	**(c :PARAL)**	Elle dessine une ligne d'aide infinie parallèle à une autre ligne
66	**(c: LANCEMENT_RAYONS)**	Elle dessine et repartit des rayons dans l'espace à partir d'un point, de manière uniforme

Chapitre 8

Bibliographie



8. Bibliographie

[Adolphe, 1991] ADOLPHE, L.
L'aide à la Décision Technique dans la conception Architecturale. Th : Energétique : Ecole des Mines de Paris : 1991

[Allen, 1979] ALLEN J.B., BERKLEY D.A.
Image method for efficiently simulating small-room acoustics. J. Acoust. Soc. Am., 1979, p. 943-950.

[Appel, 1968] APPEL, A.
Some Techniques for Shading Machine Renderings of Solids. SJCC, 1968

[AutoCAD, 2000] Manuel de personnalisation AutoCAD 2000, 2000

[Barron, 1993] BARRON, M.
Auditorium Acoustics and Architectural Design. E & FN SPON, 1993

[Beyer, 1999] BEYER, R.T.
Sound of our times. Springer-Verlag Editions, New York, 1999

[Borish, 1984] BORISH, J.
Extension of the image model to arbitrary polyhedra. J. Acoust. Soc. Am., 1984, p. 1827-1836.

[Catt-Acoustic, 1996] Manuel d'utilisation Catt-Acoustic, 1996

[Catt-Acoustic, 2002] Catt Company info [présentation en ligne]. Format World Wide Web. Disponible sur : http://www.netg.se/~catt/ [consulté le 25 Septembre 2002].

[Christensen, 1999] CHRISTENSEN, C.L.
Modelling Large Sound Sources in a Room Acoustical Calculation Program. ASA., 1999.

[Christensen, 2001] CHRISTENSEN, C.L.
Odeon a design tool for auditorium acoustics, noise control and loudspeaker systems. Reproduced Sound 17, Measuring Modeling or Muddling, Proceedings of the Institute of Acoustics, Volume 23, Part 8 2001, Stratford upon Avon 16 - 18 November 2001, p. 137 - 144

[Cremer, 1982] CREMER L., MULLER H., SCHULTZ T.
Principles and Applications of Room Acoustics. Volume 1, Applied Science Publishers, 1982

[Dalenback, 1996a] DALENBACK, B.-I.
Auralization, Virtually Everywhere. Pré-publication du 100th AES Conv. 4228, 1996.

[Dalenback, 1996b] DALENBACK, B.-I.
Room Acoustic Prediction Based on a Unified Treatment of Diffuse and Specular Reflection. JASA 100, August 1996.

[Dony, 2000] DONY, R.
Graphisme scientifique sur micro-ordinateur de la 2e à la 3e dimension. Masson, 2000

[Drumm, 1999a] DRUMM, I.
The Development and Application of an Adaptive Beam Tracing Algorithm to Predict the Acoustics of Auditoria. University of Salford, 1999.

[Drumm, 1999b] DRUMM, I.
The Development of Adative Beam Tracing. IOA Proceedings, Auditoria 1999.

[Epidaure, 1992] Manuel d'utilisation de l'application de simulation acoustique Epidaure, 1992

[Everest, 1998] EVEREST, A.F.
The master handbook of Acoustics. 3rd Edition, 1998

[Farina, 1993] FARINA, A.
An example of adding spatial impression to recorded music: signal convolution with binaural impulse responses. Proceedings. of Acoustics and Recovery of Spaces for Music, Ferrara, 27-28 October, Italy, 1993.

[Farina, 1995a] FARINA, A.
Pyramid Tracing vs. Ray tracing for the simulation of sound propagation in large rooms. 15th International Congress in Acoustics, Trondheim Norway, 1995

[Farina, 1995b] FARINA, A.
Verification of the accuracy of the pyramid tracing algorithm by comparison with experimental measurements of objective acoustic parameters. 15th International Congress in Acoustics, Trondheim Norway, 1995

[Foley, 1995] FOLEY J., VAN DAM A., FEINER S., HUGHES J., PHILLIPS R. Introduction à l'infographie, 1995

[Haines, 1989] HAINES, E.
Essential Ray Tracing Algorithms. An Introduction to Ray Tracing. In Glassner A.S. ed., Academic Press, London, 1989

[Harrington, 1995] HARRINGTON, S.
Computer Graphics-A programming Approach. International Student Edition, 1995

[Immler, 1993] IMMLER, C.
Le grand livre de la programmation AutoCAD. Micro Application, 1993

[Kajiya, 1982] KAJIYA, J.T.
Ray Tracing Parametric Patches. SIGGRAPH, 1982

[Kouzeleas, 1997] KOUZELEAS, S.
Processus informatique d'aide à la modélisation géométrique d'un espace en vue de simulation acoustique. Rapport de stage de recherche, ERIAC, Bordeaux, 1997

[Kouzeleas, 2001a] KOUZELEAS S., SEMIDOR C.
The influence of the simplified architectural model on the acoustical simulation results. 18th International Congress of Acoustics, Rome, 2001

[Kouzeleas, 2001b] KOUZELEAS, S.
Analyse des conséquences de la simplification d'un modèle architectural sur les résultats acoustiques. Article de recherche, GRECO-ERIAC, Bordeaux, 2001

[Kouzeleas, 2002] KOUZELEAS S., SEMIDOR C.
Architectural translation of the acoustical simulation results. Institute of Acoustics, Subject: Auditorium Acoustics: Historical and contemporary design and performance, Imperial College, 19-21 July 2002, London

[Kramer, 1997] KRAMER, B.
AutoLISP Treasure chest. Miller Freeman Books, San Francisco, 1997

[Krokstad, 1968] KROKSTAD A., STROM S., SORSDAL S.
Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique. Journal of Sound and Vibration, 1968, vol. 8, n° 1, p. 118-125.

[Kulowski, 1985] KULOWSKI, A.
Algorithmic representation of the ray tracing technique. Applied Acoustics, 1985, vol. 18, n° 6, p. 449-469

[Lamoral, 1975] LAMORAL, R.
Acoustique et architecture. Masson, Paris, 1975

[Lynge, 2001a] LYNGE, C.
Odeon a design tool for auditorium acoustics, noise control and loudspeaker systems. Reproduced Sound 17, Measuring, Modeling or Muddling, Proceedings of the Institute of Acoustics, vol.23, part 8, Stratford upon Avon 16 - 18 November 2001, p. 137 - 144.

[Lynge, 2001b] LYNGE, C.
User Manual of Odeon Room Acoustics Program. Version 5.0, Industrial, Auditorium and Combined Editions, Department of Acoustic Technology, Technical University of Denmark, Lyngby, August 2001.

[Naylor, 1992] NAYLOR G., RINDEL J.H.
Predicting Room Acoustical Behaviour with the ODEON Model. 124th ASA meeting, New Orleans, November 1992.

[Odeon, 1996] Manuel d'utilisation Odeon, 1966

[Odeon, 2002a] Product data - Odeon Room Acoustics Modelling Software. Format PDF, 2002. Disponible sur : http://www.bksv.com/bksv/ , [recherché fichier « Bp1950.pdf »], [consulté le 10 Septembre 2002].

[Odeon, 2002b] Odeon Room Acoustics Program. Format World Wide Web, 2002. Disponible sur : http://www.dat.dtu.dk/~odeon ,
[consulté le 25 Septembre 2002].

[Omura, 1990] OMURA, G.
The ABC's of AutoLISP. SYBEX Inc., 1990

[Quintrand et al., 1985] Quintrand P., Autran J., Florenzano M., Fregier M., Zoller J.
La conception assistée par ordinateur en architecture. Editions Hermès, 1985

[Rindel, 1994] RINDEL J.H., LYNGE C.
The use of the digital audio mainframe for room acoustical auralization. 96th Convention of Audio Engineering Society, Amsterdam, 1994.

[Savioja, 1999] SAVIOJA, L.
Modeling Techniques for Virtual Acoustics. Th : Helsinki University of Technology : Telecommunications Software and Multimedia Laboratory : Report TML-A3 : 1999.

[Semidor, 1997] SEMIDOR, C.
Place des outils prévisionnels en acoustique des lieux d'écoute dans le processus de conception architecturale. Article Cahiers de la Recherche Architecturale, 1997

[Semidor, 1999] SEMIDOR, C.
Relations entre architecture et qualité acoustique : contribution à la caractérisation acoustique d'un lieu d'écoute. Thèse : Sciences physiques, Université de Toulouse, 1999

[Semidor, 2000] SEMIDOR C., BARLET C.
Journal of Sound and Vibration, 2000, vol. 232, n° 51, p. 251-261

[Smith, 1998] SMITH, S.
Construction and verification of a computer room model using I-DEAS and RAYNOISE software. Format World Wide Web. Disponible sur : http://www.acs.psu.edu/users/smithsh/hall_acoustics.html, [consulté le 25 Septembre 2002].

[Smith, 2001] SMITH, S.
Raynoise manual meshing. Format World Wide Web. Disponible sur : http://www.acs.psu.edu/users/smithsh/presentation/manual_meshing.html [consulté le 25 Septembre 2002].

[Smith, 2002] SMITH, S.
Raynoise analysis parameters. Format World Wide Web.
Disponible sur : http://www.acs.psu.edu/users/smithsh/presentation/analysis_parameters.html [consulté le 25 Septembre 2002].

[Thuizat, 2000] THUIZAT A., GIRAULT G.
Mathématique. Collection Durrande, 2000

[van Maercke, 1993] MAERCKE V.D., MARTIN J.
The prediction of echograms and impulse responses within the Epidaure software. 38 (2-4, Special Issue on Computer Modelling and Auralisation of Sound Fields In Rooms), Applied Acoustics, 1993, p.93-114

[Vian, 1996] VIAN, J.P.
La qualité acoustique des espaces, comment la caractériser ? Acoustique & Techniques, CIDB –SFA, n° 5, 1996

[Vissio, 2000] VISSIO P., CONDAMINE M.
Algèbre linéaire et géométrie. Delagrave, 2000

[Vorlander, 1995] VORLANDER, M.
International Round Robin on Room Acoustical Computer Simulations, 15th International Congress on Acoustics, Trondheim, Norway, 26-30 June, 1995

[Whitted, 1980] WHITTED, T.
An Improved Illumination Model for Shaded Display. CACM, 1980

Développement d'un outil d'aide en simulation acoustique architecturale adaptable à un système de modélisation C.A.O.

Résumé

Le travail de recherche présenté dans cette thèse a pour objectif le rapprochement de l'aménagement et de la simulation acoustique avec la conception architecturale afin de donner les moyens à l'architecte d'apprécier et évaluer les résultats acoustiques, de lui faciliter la collaboration avec l'acousticien et enfin lui offrir une base d'aide pendant sa conception architecturale en vue de simulation acoustique.

Ceci est proposé à travers la mise en oeuvre d'une plate-forme d'aide adaptable à un logiciel de modélisation architecturale C.A.O. intégrant des moteurs de calcul acoustique, des modules graphiques et un certain nombre de recherches ici développées.

Ces recherches concernent entre autre la définition de différents processus de modélisation et simplification des modèles architecturaux en vue de simulation acoustique, la traduction des résultats acoustiques de manière architecturale, l'intégration d'une démarche architecturale dans l'aménagement acoustique et une base de données acoustique multimédia intégrée.

Mots-clés : Conception Assistée par Ordinateur (CAO), Acoustique architecturale, Acoustique de salles, Modélisation architecturale, Simulation acoustique, Aménagement acoustique, Conception architecturale, Logiciels acoustiques, Processus informatique de modélisation, Méthode de simplification, Modèle architectural simplifié, Traduction de résultats acoustiques, Algorithmes acoustiques.

Development of a help tool in architectural acoustics simulation adaptable in a modelisation CAD system

Abstract

The aim of the proposed research in this thesis is the rapprochement of the acoustical conception and simulation with the architectural conception in order to give the architect the means to appreciate and evaluate the acoustical results, facilitate his collaboration with the acoustician, and, finally, allow him to have a help base during his architectural conception for acoustical simulation.

This is proposed by the realisation of a plate-form of help adaptable to an architectural modelisation C.A.D. program, integrating acoustical calculate motors, graphical modules and research developed.

This research concerns the definition of different processes of modelisation and simplification of architectural models for acoustical simulation, the translation of the acoustical results in an architectural way, the integration of an architectural approach to the acoustical conception, and an acoustical integrated multimedia database.

Key-words: Computer Aided Design (CAD), architectural acoustics, room acoustics, architectural modelisation, acoustics simulation, acoustics conception, architectural conception, acoustics software, computering process of modelisation, simplification method, architectural simplified model, translation of the acoustical results, acoustics